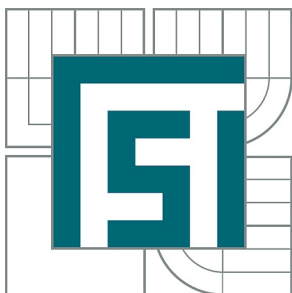


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

INTERAKTIVNÍ GRAFICKÝ SOFTWARE PRO VÝPOČTY STAVŮ VLHKÉHO VZDUCHU

THE INTERACTIVE GRAPHICAL SOFTWARE FOR CALCULATION OF MOIST AIR STATES

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. PAVEL SNÁŠEL

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. MILAN PAVELEK, CSc.

BRNO 2010

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2009/2010

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Pavel Snášel

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Technika prostředí (2301T024)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Interaktivní grafický software pro výpočty stavů vlhkého vzduchu

v anglickém jazyce:

The interactive graphical software for calculation of moist air states

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Provést literární rešerši k dané problematice. Vytvořit software pracující ve Windows, který by z různých dvojic stavových veličin pro různý celkový tlak počítal stavy vlhkého vzduchu. Software by měl pracovat interaktivně s okamžitým numerickým i grafickým výstupem v Mollierově h-x diagramu.

Cíle diplomové práce:

Vytvořit software pro určování stavů vlhkého vzduchu s výstupy užitečnými pro řešení problémů v technice prostředí

Seznam odborné literatury:

CHYSKÝ, J.: Vlhký vzduch. SNTL Praha 1977.

JANOTKOVÁ, E. - PAVELEK, M.: Výpočty stavů vlhkého vzduchu počítačem s grafickým výstupem v h - x diagramu. Vytápění, větrání, instalace 9, 2000, 3, s. 122 - 124.

PAVELEK, M. a kol.: Termomechanika. FSI VUT Brno. 2003.

HRUŠOVÁ, M. - ŠAFARÍK, P.: Základy termodynamiky vlhkého vzduchu 1. vyd. Praha: ČVUT, 1999.

ŠIFNER, O. – KLOMFAR, J.: Mezinárodní standardy termofyzikálních vlastností vody a vodní páry. Academia, nakladatelství Akademie věd ČR. Praha 1996.

Vedoucí diplomové práce: prof. Ing. Milan Pavelek, CSc.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2009/10.

V Brně, dne



doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.
Ředitel ústavu

doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

Anotace

Cílem této práce je vytvořit interaktivní grafický program pro výpočty stavů vlhkého vzduchu a vyznačení těchto stavů v Mollierově i-x diagramu. Za hlavní oblast využití tohoto programu je považován obor klimatizace, proto jsou do programu začleněny také výpočty základních úprav vlhkého vzduchu.

Klíčová slova

Vlhký vzduch, termodynamické veličiny, Mollierův i-x diagram, grafický program, ohřev, chlazení, míšení, vlhčení.

Annotation

The aim of this thesis is to create an interactive graphical software intended for calculations of states of moist air and marking these states in Molliere's i-x diagram. The branch of air-conditioning is considered to be the main field of application of this software, so the calculations of basic changes of moist air have been included to this software as well.

Key words

Moist air, thermodynamic quantities, Molliere's i-x diagram, graphical software, heating, cooling, mixing, moistening.

Bibliografická citace

SNÁŠEL, P. Interaktivní grafický software pro výpočty stavů vlhkého vzduchu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 58 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Milan Pavelek, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma „Interaktivní grafický software pro výpočty stavů vlhkého vzduchu“ vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených na seznamu, který je přílohou této práce.

1. května 2010


.....
Bc. Pavel Snášel

Poděkování

*Touto cestou bych chtěl poděkovat
prof. Ing. Milanu Pavelkovi, CSc. za četné
informace, cenné rady, připomínky a ochotu.*

*Děkuji také rodičům za vytrvalou
podporu ve studiu.*

OBSAH

ANOTACE	5
PROHLÁŠENÍ.....	7
PODĚKOVÁNÍ.....	9
OBSAH	11
1 ÚVOD	13
2 SLOŽKY VLHKÉHO VZDUCHU A JEJICH VLASTNOSTI.....	14
2.1 SUCHÝ VZDUCH	14
2.2 VODA	16
2.2.1 FÁZOVÝ DIAGRAM VODY	17
2.2.2 KŘIVKA VARU	19
2.2.3 KŘIVKA SUBLIMACE	20
2.2.4 KŘIVKA TÁNÍ.....	21
3 VLHKÝ VZDUCH	22
3.1 ZÁKLADNÍ VZTAHY PRO VÝPOČTY STAVŮ VLHKÉHO VZDUCHU	22
3.2 VYJÁDŘENÍ VLHKOSTI VZDUCHU	23
3.3 ENTALPIE VLHKÉHO VZDUCHU	25
3.4 MOLLIERŮV I-X DIAGRAM VLHKÉHO VZDUCHU	28
4 IZOBARICKÉ ZMĚNY STAVU VLHKÉHO VZDUCHU	32
4.1 OHŘEV.....	32
4.2 CHLAZENÍ.....	32
4.3 MÍŠENÍ.....	34
4.4 VLNČENÍ.....	35
4.5 ZMĚNA STAVU VZDUCHU V KLIMATIZOVANÉM PROSTORU	35
5 PROCEDURY URČOVÁNÍ STAVŮ VLHKÉHO VZDUCHU	37
5.1 PROCEDURA p, t, φ	38
5.2 PROCEDURA p, t, x	39
5.3 PROCEDURA p, t, i	39
5.4 PROCEDURA p, t, t_m	41
5.5 PROCEDURA p, t, t_r	41
5.6 PROCEDURA p, φ, x	42
5.7 PROCEDURA p, φ, i	42
5.8 PROCEDURA p, φ, t_m	42
5.9 PROCEDURA p, φ, t_r	43
5.10 PROCEDURA p, x, i	43
5.11 PROCEDURA p, x, t_m	44
5.12 PROCEDURA p, x, t_r	44
5.13 PROCEDURA p, i, t_m	45
5.14 PROCEDURA p, i, t_r	45
5.15 PROCEDURA p, t_m, t_r	45

6	PROCEDURY ŘEŠENÍ IZOBARICKÝCH ZMĚN VLHKÉHO VZDUCHU	46
6.1	PROCEDURA <i>OHŘEV</i>	47
6.2	PROCEDURA <i>CHLAZENÍ</i>	47
6.3	PROCEDURA <i>MÍŠENÍ</i>	48
6.4	PROCEDURA <i>VLHČENÍ</i>	49
6.5	PROCEDURA <i>ZMĚNA STAVU VZDUCHU V KLIMATIZOVANÉM PROSTORU</i>	50
6.6	PROCEDURA <i>PSYCHROMETRICKÝ VÝPOČET</i>	50
7	POPIS PROGRAMU VLHKÝ VZDUCH 3.0	51
8	ZÁVĚR.....	52
9	SEZNAM NEJDŮLEŽITĚJŠÍCH OZNAČENÍ.....	53
10	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	55
11	PŘÍLOHY	57
11.1	NÁVOD K OBSLUZE PROGRAMU VLHKÝ VZDUCH 3.0	
11.2	CD-ROM S INSTALACÍ PROGRAMU VLHKÝ VZDUCH 3.0	
11.3	CD-ROM S ELEKTRONICKOU VERZÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE	

1 Úvod

Vlhký vzduch je přirozeným prostředím nejen pro člověka, ale je i nejčastějším provozním prostředím většiny strojů a zařízení. Hraje stěžejní roli v oboru klimatizace, neméně důležitý je i v mnoha dalších oblastech technické praxe, jmenujme alespoň techniku chlazení či sušárenství.

Při řešení problémů týkajících se vlhkého vzduchu se obvykle využívá Mollierův i-x (entalpie - měrná vlhkost) diagram. Tento diagram lze sestavit na základě známých vztahů stavových veličin, stavových funkcí a známých fyzikálních vlastností jednotlivých složek vlhkého vzduchu. Diagram je sestaven pro jeden celkový tlak a s pomocí dvou známých stavových veličin z něj můžeme odečítat ostatní stavové veličiny, které neznáme. Při každém odečítání z tištěného diagramu se ale dopouštíme chyby. Velikost této chyby záleží mj. na tom, jak velký a podrobný diagram používáme, ale také na tom, jakou oblast námi použitý diagram zachycuje. Tak pro účely klimatizace nám bude vyhovovat diagram s teplotami vzduchu např. od $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, zatímco v sušárenství nás bude zajímat oblast s teplotami značně vyššími, např. od $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pro praxi se chyba při použití těchto specializovaných diagramů může mnohdy jevit jako zanedbatelná. Navíc provádět přesný, ale zdoluhavý výpočet „na papíře“ by bylo zřejmě neefektivní. S využitím počítačové techniky a specializovaného softwaru však lze dosáhnout přesného výpočtu, a to velmi rychle. Právě vytvoření a popis takového počítačového programu je náplní této diplomové práce.

2 Složky vlhkého vzduchu a jejich vlastnosti

Hovoříme-li o *vzduchu*, myslíme tímto termínem *vlhký vzduch*, který je směsí suchého vzduchu a vody. V této kapitole budou uvedeny právě vlastnosti suchého vzduchu a vody.

2.1 Suchý vzduch

Je majoritní složkou vzduchu vlhkého, tvoří obvykle 96 [2] a více hmotnostních procent w_i v této směsi, a tak má významný podíl na vlastnostech vlhkého vzduchu. Samotný suchý vzduch je směsí plynů, jejíž složení se v atmosféře do výšky 100 km [2] prakticky nemění. Výjimku je hlavně obsah CO_2 , který je ovlivňován především průmyslovou činností a hustotou dopravy v daném místě. Pro jednotnost bylo mezinárodní úmluvou přijato standardní složení suchého vzduchu, uvedené v tab. 2.1.

Tab. 2.1 Standardní složení suchého vzduchu [2]

Plyn	Chemická značka	Molární hmotnost $M_i [\text{kg} \cdot \text{kmol}^{-1}]$	Objemový zlomek $x_{vi} \cdot 100 [\%]$
Dusík	N_2	28,0134	78,09
Kyslík	O_2	31,9988	20,95
Argon	Ar_2	39,944	0,93
Oxid uhličitý	CO_2	44,0098	0,03
Neon	Ne_2	20,179	0,0018
Helium	He_2	4,0026	0,000524
Krypton	Kr_2	83,8	0,0001
Xenon	Xe_2	131,3	0,000008
Vodík	H_2	2,016	0,000005
Ozón	O_3	47,9982	0,000001

Z hodnot M_i a x_{vi} v tabulce můžeme určit střední zdánlivou molární hmotnost suchého vzduchu $M_v = 28,964 \text{ kg} \cdot \text{kmol}^{-1}$. Měrná plynová konstanta suchého vzduchu je dána vztahem

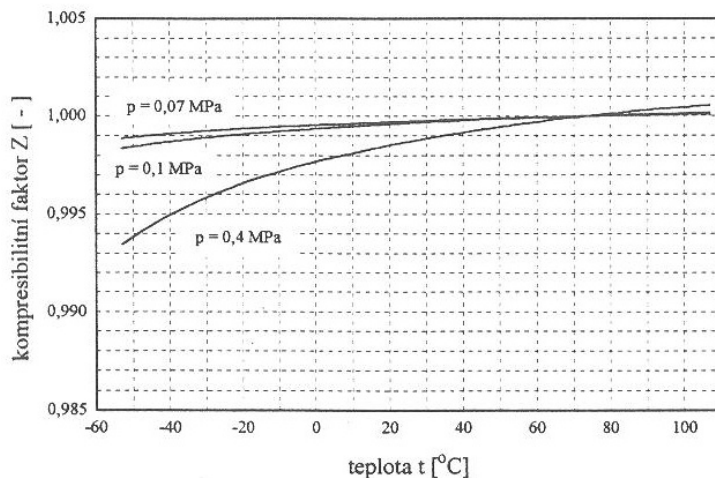
$$r_v = \frac{R_m}{M_v} = \frac{8314,41}{28,964} = 287,062 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}.$$

Při výpočtu r_v jsme uvažovali, že se suchý vzduch chová jako směs ideálních plynů, tedy opět jako ideální plyn. Ve skutečnosti tomu tak zcela není. Pro porovnání, jak moc se chování určitého plynu liší od chování plynu ideálního, nám poslouží kompresibilní faktor Z . Ten je definován vztahem

$$Z = \frac{p \cdot v}{r \cdot T}. \quad (2.1)$$

Pro ideální plyn, tedy plyn řídící se stavovou rovnicí, je zřejmě hodnota kompresibilního faktoru $Z=1$. Pro plyn skutečný však toto platit nemusí, pak $Z \neq 1$. Na obr. 2.1 je zobrazena závislost kompresibilního faktoru suchého vzduchu jako funkce teploty při různých tlacích. Berme v úvahu běžné hodnoty atmosférického tlaku, tedy $p \approx 0,1 \text{ MPa}$. Podle příslušného průběhu se pak na daném teplotním intervalu kompresibilní

faktor Z suchého vzduchu odchyľuje od hodnoty $Z = 1$ jen velmi nepatrně. Za těchto podmínek tedy lze na suchý vzduch s dostatečnou přesností aplikovat vztahy popisující chování ideálního plynu.

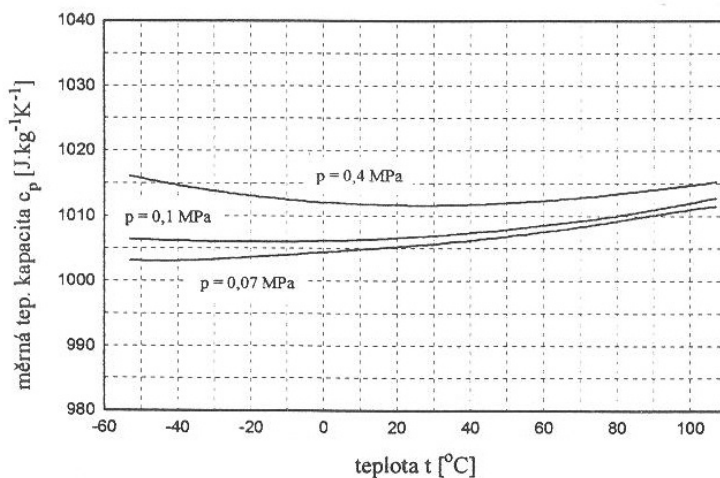


Obr. 2.1 Kompresibilní faktor Z suchého vzduchu jako funkce p , t [2]

Z fyzikálních vlastností nás bude dále zajímat především měrná tepelná kapacita suchého vzduchu při konstantním tlaku, kterou budeme dále označovat c_{pv} . Její přibližnou hodnotu c_{pv}^I lze stanovit z předpokladu, že suchý vzduch je tvořen převážně dusíkem a kyslíkem. Protože oba tyto plyny jsou dvouatomové, uvažujeme hodnotu Poissonovy konstanty $\kappa = 1,4$ [9]. Pak lze hodnotu c_{pv}^I určit vztahem

$$c_{pv}^I = \frac{\kappa}{\kappa - 1} \cdot r_v = \frac{1,4}{1,4 - 1} \cdot 287,06 = 1004,71 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Ve skutečnosti je $\kappa = 1,339$ a hodnota c_{pv} se uvádí $c_{pv} = 1005,968 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ [2]. Pro úplnost uvedme, že hodnota c_{pv} je závislá na teplotě a tlaku tak, jak zobrazuje obr. 2.2.



Obr. 2.2 Měrná tepelná kapacita suchého vzduchu při konstantním tlaku c_{pv} jako funkce p , t [2]

Z průběhů opět vyplývá, že budeme-li c_{pv} považovat za konstantní, nedopustíme se při běžných atmosférických tlacích příliš velké chyby. Při výpočtech budeme uvažovat $\bar{c}_{pv} = 1,01 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, což je střední měrná tepelná kapacita suchého vzduchu za stálého tlaku na teplotním intervalu -30 až 100 °C [9].

2.2 Voda

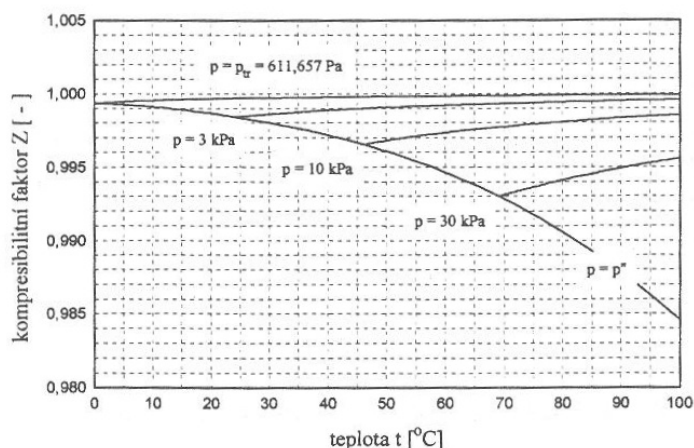
Ačkoliv se v přírodě hmotnostní podíl vody ve vlhkém vzduchu pohybuje v řádech tisícín, má i přes tento nepatrný podíl zásadní význam pro život na Zemi. V technických aplikacích je pro svou dostupnost a vhodné fyzikální vlastnosti (zejména pro svou vysokou hodnotu měrné tepelné kapacity) nejužívanějším teplotním médiem. Proto bylo a stále je vynakládáno značné úsilí do výzkumu a unifikace vlastností vody. V roce 1995 schválila Mezinárodní asociace pro vlastnosti vody a vodní páry (The International Association for the Properties of Water and Steam; IAPWS) dokument IAPWS - 95, který formuluje termodynamické vlastnosti obyčejné vodní substance pro obecné a vědecké použití [2]. Vybrané vlastnosti jsou uvedeny v tabulce 2.2. Indexy p , k , t se vztahují postupně k plynnému, kapalnému a tuhému skupenství vody. Hodnoty c_k , c_t , l_{12} , l_{23} a l_{13} jsou zde uvedeny pro teplotu a tlak trojného bodu.

Tab. 2.2 Vybrané vlastnosti vody [2]

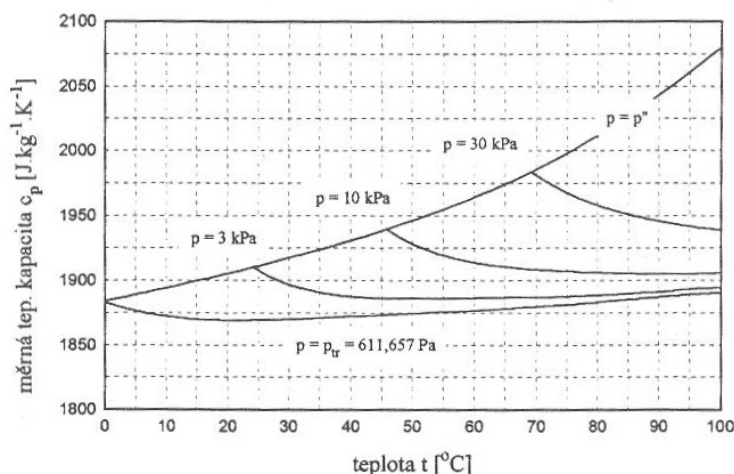
Teplota trojného bodu	$T_{tr} = 273,16 \text{ K}$
Tlak trojného bodu	$p_{tr} = 611,657 \text{ Pa}$
Kritická teplota	$T_{kr} = 647,096 \text{ K}$
Kritický tlak	$p_{kr} = 22,064 \text{ MPa}$
Molární hmotnost	$M_p = 18,01534 \text{ kg} \cdot \text{kmol}^{-1}$
Měrná plynová konstanta	$r_p = 461,51805 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Měrná tepelná kapacita plynné fáze při konstantním tlaku	$c_{pp} = 1884 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Měrná tepelná kapacita kapalně fáze	$c_k = 4219 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Měrná tepelná kapacita tuhé fáze	$c_t = 2093,4 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Měrné skupenské teplo výparné	$l_{23} = 2500,9 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
Měrné skupenské teplo tání	$l_{12} = 333,4 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
Měrné skupenské teplo sublimace	$l_{13} = 2834,3 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

Na obr. 2.3 je zobrazena závislost kompresibilního faktoru Z vodní páry na teplotě a tlaku. Ze závislosti vyplývá, že chování vodní páry lze přibližně popsat stavovou rovnicí, avšak pouze při nízkých tlacích.

Hodnota měrné tepelné kapacity vodní páry při konstantním tlaku c_{pp} je uvedena v tab. 2.2 pro páru obsaženou v atmosférickém vzduchu za běžných podmínek [2]. Její závislost na teplotě a tlaku znázorňuje obrázek 2.4. Z průběhu vyplývá, že hodnota c_{pp} je značně závislá na teplotě a tlaku. Při výpočtech budeme uvažovat $\bar{c}_{pp} = 1,84 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, což je střední měrná tepelná kapacita vodní páry do teploty 100 °C a tlaku 10 kPa [9].



Obr. 2.3 Kompresibilní faktor Z vodí páry jako funkce p , t [2]



Obr. 2.4 Měrná tepelná kapacita vodní páry při konstantním tlaku c_{pp} jako funkce p , t [2]

Rovněž je nutné při výpočtech uvažovat se střední měrnou tepelnou kapacitou kapalně c_k a tuhé c_t fáze, nikoliv s hodnotami odpovídajícími trojnému bodu. Proto v souladu s [9] budeme uvažovat $\bar{c}_k = 4,187 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ a $\bar{c}_t = 2,09 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

2.2.1 Fázový diagram vody

Protože se voda může ve vzduchu vyskytovat ve třech skupenstvích, je nezbytné uvést p - T diagram vody, který zobrazuje oblasti existence či koexistence těchto fází, viz obr. 2.5.

Oblasti pevné (led), kapalně (voda) a plynné (pára) fáze jsou zde od sebe odděleny mezními křivkami 12, 23 a 13. Křivky vychází z tzv. trojného bodu označeného tr . Tento bod je jednoznačně určen teplotou trojného bodu T_{tr} a tlakem trojného bodu p_{tr} , čímž udává jedinečné podmínky koexistence všech tří fází dané látky. Jednotlivé křivky pak vyjadřují podmínky koexistence dvou příslušných fází.

Křivka 12 se nazývá křivkou tání či tuhnutí a v diagramu odděluje oblast pevné a kapalně fáze. Každý bod na této křivce určuje podmínky koexistence fáze kapalně a pevné. Jinými slovy, tato křivka vyjadřuje závislost teploty tání či tuhnutí na tlaku $T_{12} = T_{12}(p)$.

Křivka 23 se nazývá křivkou varu či kondenzace a v diagramu odděluje oblast kapalně a plynné fáze. Každý bod na této křivce určuje podmínky koexistence fáze kapalně a plynné.

Jinými slovy, tato křivka vyjadřuje závislost teploty varu či kondenzace na tlaku $T_{23} = T_{23}(p)$. Křivka 23 je omezena, a to tzv. kritickým bodem, který je zcela určen kritickou teplotou T_{kr} a kritickým tlakem p_{kr} . Při kritických a nadkritických parametrech, tedy pro $T \geq T_{kr}$ a $p \geq p_{kr}$, se pohybujeme v tzv. fluidní oblasti [9], která je na obr. 1.3 označena (f). Zde již nelze rozlišovat mezi kapalinou a plynem.

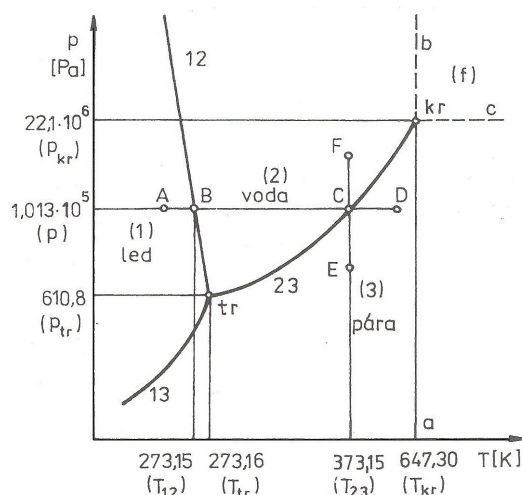
Křivka 13 se nazývá křivkou sublimace či desublimace a v diagramu odděluje oblast pevné a plynné fáze. Každý bod na této křivce určuje podmínky koexistence fáze pevné a plynné. Jinými slovy, tato křivka vyjadřuje závislost teploty sublimace či desublimace na tlaku $T_{13} = T_{13}(p)$.

Popíšeme příklad ohřevu znázorněného v p - T diagramu. Mějme 1 kg ledu o stavu A a při konstantním tlaku $p = 101325 Pa$ mu dodávejme teplo. Led se bude postupně ohřívat až narazíme na křivku tání v bodě B, ze kterého vyplývá, že led bude tát při teplotě $T_{12} = 273,15 K$. I když přivádíme teplo stále se stejným výkonem, teplota látky se nyní nemění. Tento stav platí do doby, než přivedeme množství tepla odpovídající měrnému teple tání $l_{12} [J \cdot kg^{-1}]$ a veškerý led roztaje na vodu o teplotě $T_{12} = 273,15 K$. Poté opět teplota vody poroste až do doby, než narazíme na křivku varu v bodě C, ze kterého vyplývá, že voda bude vřít při teplotě $T_{23} = 373,15 K$. Zde opět zaznamenáme prodlevu, než teplota látky začne opět růst. To nastane v momentě, kdy dodáme teplo odpovídající měrnému teple vypařování $l_{23} [J \cdot kg^{-1}]$ a veškerá sytá kapalina se tak promění v sytou páru. Pojem sytá kapalina a sytá pára představuje kapalinu respektive páru o teplotě varu T_{23} . Dalším přívodem tepla zvyšujeme teplotu páry a mluvíme pak o páře přehřáté.

Z fázového diagramu také vyplývá, že změna teploty není jedinou možností, jak lze dosáhnout změny skupenství. Druhou možností je změna tlaku. Uvažujme stav E v oblasti páry. Budeme-li za konstantní teploty páry o tomto stavu komprimovat, dostaneme se postupně z oblasti přehřáté páry až na stav páry syté v bodě C. Zde sytá pára zkapalní na sytou kapalinu, a to při tlaku, který označujeme jako tlak sytých par p_p'' . Tlak sytých par je důležitá termodynamická veličina a lze ho vyjádřit jako funkci teploty $p_p'' = p_p''(T)$.

Na tomto místě je vhodné zmínit rozdíl mezi párou a plynem. Párou myslíme látku v plynném skupenství, a to za vysokých tlaků ve stavu blízkém zkapalnění. Pára je tedy plynnou fází o teplotě blízké teplotě varu T_{23} za daného tlaku. Plynem myslíme rovněž látku v plynném skupenství, avšak ve stavu značně přehřátém. Plyn je tedy plynnou fází o teplotě značně vyšší, než je teplota varu T_{23} při daném tlaku. Hranice, kdy plynnou fází nazýváme párou a kdy plynem, není exaktně vymezena.

Z hlediska teorie vlhkého vzduchu je důležité znát podmínky fázových změn vody, tedy průběhy mezních křivek popsaných závislostmi $p(T)$. Pro každou jednu mezní křivku je přitom v literatuře možné najít hned několik závislostí, od funkcí jednoduchých až po funkce značně složité. To je důsledek toho, jak se vyvíjely nároky na přesnost popisu podmínek fázových změn. V následujících podkapitolách uvedeme jen vybrané formulace, které byly využity při tvorbě počítačového programu.



Obr. 2.5 p - T diagram vody [3]

2.2.2 Křivka varu

IAPWS [12] v roce 1995 formulovala pro teplotní interval $273,16K < T < 647,096K$ (tedy $T_{tr} < T < T_{kr}$) následující závislost tlaku sytých vodních par p_p'' na teplotě

$$\ln\left(\frac{p_p''}{p_{kr}}\right) = \frac{T_{kr}}{T} \cdot (a_1 \cdot \tau + a_2 \cdot \tau^{1,5} + a_3 \cdot \tau^3 + a_4 \cdot \tau^{3,5} + a_5 \cdot \tau^4 + a_6 \cdot \tau^{7,5}), \quad (2.2a)$$

kde p_p'' [Pa] je tlak sytých par, T [K] je teplota, τ [–] je bezrozměrný parametr daný vztahem $\tau = 1 - \frac{T}{T_{kr}}$, $p_{kr} = 22,064 \cdot 10^6$ Pa je kritický tlak, $T_{kr} = 647,096K$ je kritická teplota a koeficienty v rovnici nabývají hodnot

$$\begin{aligned} a_1 &= -7,85951783, & a_4 &= 22,6807411, \\ a_2 &= 1,84408259, & a_5 &= -15,9618719, \\ a_3 &= -11,7866497, & a_6 &= 1,80122502. \end{aligned}$$

Podle ASHRAE [1] je závislost tlaku sytých vodních par $p_p''(t)$ pro teploty v rozsahu $0^\circ C$ až $200^\circ C$ dána vztahem

$$\ln p_p'' = \frac{C_8}{T} + C_9 + C_{10} \cdot T + C_{11} \cdot T^2 + C_{12} \cdot T^3 + C_{13} \cdot \ln T, \quad (2.2b)$$

kde p_p'' [Pa] je tlak sytých par, T [K] je teplota a koeficienty v rovnici nabývají hodnot

$$\begin{aligned} C_8 &= -5,8002206 \cdot 10^3, & C_{11} &= 4,1764768 \cdot 10^{-5}, \\ C_9 &= 1,3914993 \cdot 10^0, & C_{12} &= -1,4452093 \cdot 10^{-8}, \\ C_{10} &= -4,8640239 \cdot 10^{-2}, & C_{13} &= 6,5459673 \cdot 10^0. \end{aligned}$$

V České republice zažitá a hojně užívaná formulace podle [4] uvádí závislost tlaku sytých par pro teploty v rozsahu $0^\circ C$ až $80^\circ C$ s nepřesností menší jak 1 ‰ ve tvaru

$$\ln p_p'' = 23,58 - \frac{4044,2}{235,6 + t}, \quad (2.2c)$$

kde p_p'' [Pa] je tlak sytých par a t [$^\circ C$] je teplota. Tato jednoduchá formulace je tedy relativně přesná a její značnou výhodou je, že z ní můžeme explicitně vyjádřit teplotu jako funkci parciálního tlaku, tedy $t(p_p'')$, což předešlé formulace neumožňují.

Další závislost, která popisuje tvar mezní křivky 23, byla získána dle [11] proložením tabelovaných hodnot tlaku sytých par pro rozsah teplot $0,01^\circ C$ až $200^\circ C$ a má tvar

$$\log p_p'' = 2,794279 \cdot t^0 + 3,04064 \cdot 10^{-2} \cdot t^1 - 9,79684 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 + 1,5515567 \cdot 10^{-7} \cdot t^3, \quad (2.2d)$$

kde p_p'' [Pa] je tlak sytých par a t [$^\circ C$] je teplota.

2.2.3 Křivka sublimace

Podle IAPWS [6] platí pro tlak sytých par $p_p''(t)$ pro teploty $50K < T < 273,16K$ následující závislost

$$\ln\left(\frac{p_p''}{p_{tr}}\right) = \frac{T_{tr}}{T} \cdot \sum_{i=1}^3 \left[a_i \cdot \left(\frac{T}{T_{tr}} \right)^{b_i} \right], \quad (2.3a)$$

kde p_p'' [Pa] je tlak sytých par, T [K] je teplota, $p_{tr} = 611,657 Pa$ je tlak trojného bodu, $T_{tr} = 273,16K$ je teplota trojného bodu a koeficienty v rovnici nabývají hodnot

$$\begin{aligned} a_1 &= -21,2144006, & b_1 &= 0,003333333333, \\ a_2 &= 27,3503849, & b_2 &= 1,206666667, \\ a_3 &= -6,10597130, & b_3 &= 1,703333333. \end{aligned}$$

Podle ASHRAE [1] je závislost tlaku sytých vodních par $p_p''(t)$ pro teploty v rozsahu $-100^\circ C$ až $0^\circ C$ dána vztahem

$$\ln p_p'' = \frac{C_1}{T} + C_2 + C_3 \cdot T + C_4 \cdot T^2 + C_5 \cdot T^3 + C_6 \cdot T^4 + C_7 \cdot \ln T, \quad (2.3b)$$

kde p_p'' [Pa] je tlak sytých par, T [K] je teplota a koeficienty v rovnici nabývají hodnot

$$\begin{aligned} C_1 &= -5,6745359 \cdot 10^3, & C_5 &= 2,0747825 \cdot 10^{-9}, \\ C_2 &= 6,392\,5247 \cdot 10^0, & C_6 &= -9,4840240 \cdot 10^{-13}, \\ C_3 &= -9,6778430 \cdot 10^{-3}, & C_7 &= 4,1635019 \cdot 10^0, \\ C_4 &= -6,2215701 \cdot 10^{-7}, \end{aligned}$$

Jiná, v České republice opět zažitá a hojně užívaná formulace podle [4], uvádí závislost tlaku sytých par pro teploty v rozsahu $-20^\circ C$ až $0^\circ C$ s nepřesností menší jak 1 ‰, a to vztahem

$$\ln p_p'' = 28,926 - \frac{6148}{273,1 + t}, \quad (2.3c)$$

kde p_p'' [Pa] je tlak sytých par a t [$^\circ C$] je teplota. Jde opět o formulaci jednoduchou a relativně přesnou. Její výhodou je také to, že z ní můžeme explicitně vyjádřit teplotu jako funkci parciálního tlaku, tedy $t(p_p'')$, což předchází formulace neumožňují.

Další závislost, která popisuje tvar mezní křivky I3, byla získána dle [11] proložením tabelovaných hodnot tlaku sytých par pro rozsah teplot $-50^\circ C$ až $0,01^\circ C$ a má tvar

$$\log p_p'' = 2,7858 \cdot t^0 + 3,72 \cdot 10^{-2} \cdot t^1 - 1,0 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 + 5,0 \cdot 10^{-6} \cdot t^3, \quad (2.3d)$$

kde p_p'' [Pa] je tlak sytých par a t [$^\circ C$] je teplota.

2.2.4 Křivka tání

Závislost udávající tvar mezní křivky 12 je pro tlaky v rozsahu $p_{tr} = 611,657 \text{ Pa}$ až do tlaku $p = 200 \text{ MPa}$ dle IAPWS [6] formulována

$$p = p_{tr} \cdot \left[1 + \sum_{i=1}^3 a_i \cdot \left[1 - \left(\frac{T_{12}}{T_{tr}} \right)^{b_i} \right] \right], \quad (2.4a)$$

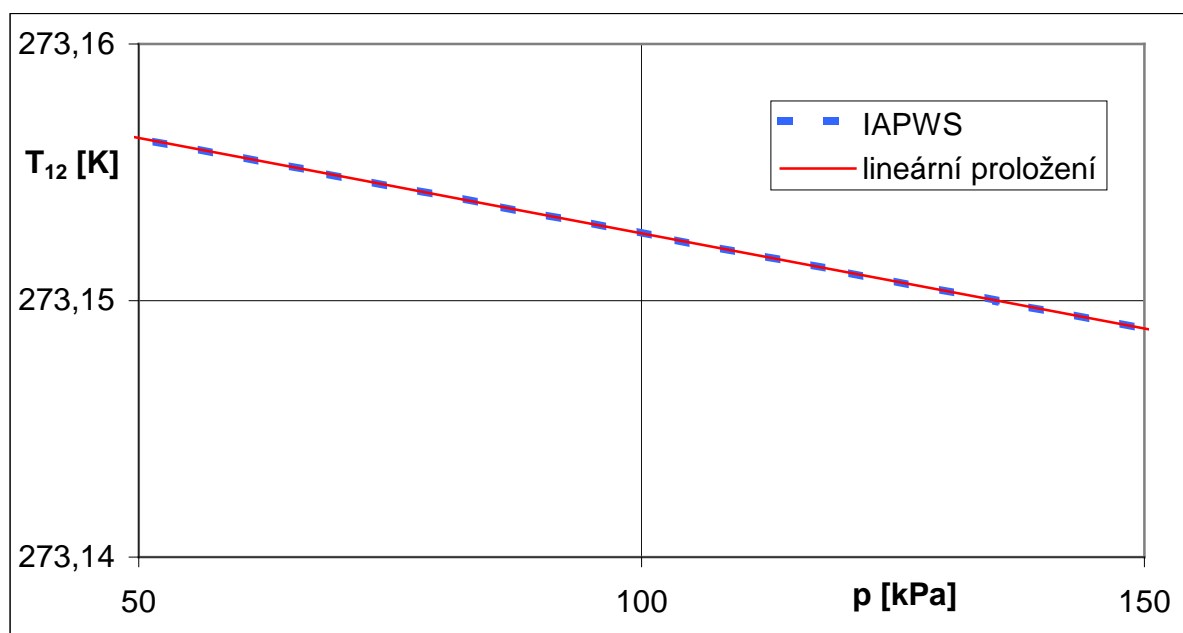
kde $p_{tr} = 611,657 \text{ Pa}$ je tlak trojného bodu, $T_{tr} = 273,16 \text{ K}$ je teplota trojného bodu, $T_{12} [\text{K}]$ je teplota tání při tlaku $p [\text{Pa}]$ a koeficienty a_i, b_i nabývají hodnot

$$\begin{aligned} a_1 &= 0,119539337 \cdot 10^7, & b_1 &= 0,300000 \cdot 10^1, \\ a_2 &= 0,808183159 \cdot 10^5, & b_2 &= 0,257500 \cdot 10^2, \\ a_3 &= 0,333826860 \cdot 10^4, & b_3 &= 0,103750 \cdot 10^3. \end{aligned}$$

Pro běžné atmosférické tlaky je průběh této funkce téměř lineární a lze ho s dostatečnou přesností proložit lineární závislostí

$$p = -13462550,86 \cdot t_{12} + 135237,17. \quad (2.4b)$$

Jak ilustruje graf na obr. 2.6, průběhy závislostí (2.4a) a (2.4b) v intervalu tlaků $p = 50 \text{ kPa}$ až $p = 150 \text{ kPa}$ prakticky splývají. K průběhům poznamenejme, že normálnímu tlaku $p = 101325 \text{ Pa}$ bývá přisuzována teplota tání $T_{12} = 273,15 \text{ K}$, což je hodnota zaokrouhlená. Přesná hodnota teploty tání při normálním tlaku činí $T_{12} = 273,152519 \text{ K}$ [5]. Tomu odpovídají i průběhy závislostí na obr. 2.6.



Obr. 2.6 Závislost teploty tání na tlaku dle rovnic (2.4a) a (2.4b)

3 Vlhký vzduch

Voda obsažená ve vlhkém vzduchu může být ve skupenství plynném, kapalném i tuhém. Plynné skupenství vody ve vzduchu je za běžného atmosférického tlaku $p \approx 0,1 \text{ MPa}$ a při běžných teplotách blízko stavu nasycení a mluvíme proto o vodní páře. Vlhký vzduch je tedy příkladem směsi plynů a par. Množství vodní páry ve směsi se suchým vzduchem je za daného celkového tlaku a za dané teploty limitováno. Jinými slovy určité množství suchého vzduchu pojme při daném celkovém tlaku a při dané teplotě jen omezené množství vodní páry, zatímco přebytečná vlhkost se vysráží (v závislosti na teplotě) ve formě vodních kapiček a/nebo krystalků ledu.

Pokud bychom do suchého vzduchu při daném celkovém tlaku a dané teplotě postupně přiváděli vodní páru, dostali bychom postupně vzduch vlhkostí

- nenasycený,
- nasycený,
- přesycený.

V nenasycené oblasti je vlhký vzduch tvořen suchým vzduchem a přehřátou vodní párou. Dalším přiváděním vlhkosti bychom zvyšovali parciální tlak par p_p , až bychom dosáhli tlaku sytých par p_p'' , což je stav, kdy je vlhký vzduch tvořen suchým vzduchem a sytou vodní párou. Říkáme také, že je vzduch parami právě nasycen a mluvíme o nasyceném vzduchu. Jak bylo zmíněno, tlak sytých par p_p'' závisí na teplotě, tedy $p_p''(T)$, a pro vodní páru platí, že s rostoucí teplotou roste i tlak sytých par. S teplotou tedy roste i množství vodní páry, kterou je vzduch schopen pojmout. Konkrétní funkční závislosti $p_p''(T)$ byly zmíněny v kapitole o vlastnostech vody. Pokud bychom v přivádění vodní páry pokračovali dále, vzduch bychom přesytili a docházelo by k vysrážení nadbytečné vlhkosti, jak již bylo uvedeno.

Z předchozího odstavce vyplývá, že nenasycený a nasycený vzduch je směsí homogenní, neboť je tvořen:

- suchým vzduchem a vodou ve skupenství plynném (vodními parami).

V ostatních případech jde o směs heterogenní a v závislosti na teplotě směsi mohou nastat hned tři situace, ve kterých je vlhký vzduch tvořen:

- suchým vzduchem, vodou ve skupenství plynném a kapalném (*vodní mlha* [9]),
- suchým vzduchem, vodou ve skupenství plynném a tuhém (*ledová mlha* [9]),
- suchým vzduchem, vodou ve skupenství plynném, kapalném a tuhém (*směs vodní a ledové mlhy* [9]).

S vodní mlhou se v přírodě můžeme setkat, pokud $t > t_{12}(p) \approx 0^\circ\text{C}$, a to např. ve formě mlhy, deště, mrholení či rosy. S ledovou mlhou se můžeme setkat pokud $t < t_{12}(p) \approx 0^\circ\text{C}$, a to ve formě sněhu, ledových krystalků či jinovatky. Při teplotě $t = t_{12}(p) \approx 0^\circ\text{C}$ můžeme pozorovat směs vodní a ledové mlhy, a to na příklad ve formě deště se sněhem.

3.1 Základní vztahy pro výpočty stavů vlhkého vzduchu

Problematikou výpočtu stavů vlhkého vzduchu se zabývá např. literatura [3], [8], [9], [2] či [4]. Zde uvedeme vybrané vztahy nezbytné pro tvorbu počítačového programu. Pro odlišení, které dané složky vlhkého vzduchu se veličina týká, budeme používat indexy:

- v - suchý vzduch,
- p - přehřátá vodní pára,
- k - kapalná fáze,
- t - tuhá fáze.

Ze zákona zachování hmotnosti plyne pro celkovou hmotnost m [kg] vlhkého vzduchu vztah

$$m = m_v + m_p + m_k + m_t. \quad (3.1)$$

Tento vztah platí pro obecný stav vzduchu. V případě, že se ve směsi nevyskytuje kapalná či tuhá složka, tak se vztah redukuje.

V souladu s Oswaldovým zákonem pro objem vlhkého vzduchu V [m³] platí

$$V_v = V_p = V. \quad (3.2)$$

Tento vztah platí pro nenasycený a nasycený vzduch. Lze jej ale použít i pro popis objemových poměrů vzduchu přesyceného, neboť objem vodních kapiček a ledových krystalků lze považovat za zanedbatelný [9].

S pomocí Daltonova zákona můžeme napsat vztah celkového tlaku vlhkého vzduchu jako součet parciálních tlaků jeho složek

$$p = p_v + p_p. \quad (3.3)$$

Předpoklady, za kterých se suchý vzduch a vodní pára chovají přibližně jako ideální plyn, již byly zmíněny. Můžeme tedy psát příslušné stavové rovnice jednotlivých složek vlhkého vzduchu

$$p_v \cdot V = m_v \cdot r_v \cdot T, \quad (3.4)$$

$$p_p \cdot V = m_p \cdot r_p \cdot T. \quad (3.5)$$

3.2 Vyjádření vlhkosti vzduchu

Množství vody obsažené ve vzduchu obvykle značně kolísá a kvantifikujeme ho pomocí vlhkosti. Rozlišujeme vlhkost absolutní, relativní a měrnou.

Absolutní vlhkost Φ [kg · m⁻³] udává hmotnost vody obsažené v jednotce objemu vlhkého vzduchu

$$\Phi = \frac{m_p + m_k + m_t}{V}. \quad (3.6)$$

Pokud se stav vlhkého vzduchu nachází mimo přesycenou oblast, je zřejmě $m_k = m_t = 0$ a

vztah (3.6) se redukuje na $\Phi = \frac{m_p}{V}$. Absolutní hmotnost má v tomto případě stejnou hodnotu jako hustota vodní páry ρ_p [kg · m⁻³] ve vzduchu, která je daná vztahem

$$\rho_p = \frac{m_p}{V_p} = \frac{m_p}{V} \text{ nebo } \rho_p = \varphi \cdot \rho_p'', \quad (3.7a)$$

kde $\varphi [-]$ je relativní vlhkost (viz dále) a $\rho_p'' [kg \cdot m^{-3}]$ je hustota sytých par, kterou lze vyjádřit ze stavové rovnice vztahem

$$\rho_p'' = \frac{p_p}{r_p \cdot T}. \quad (3.7b)$$

Hustotu $\rho_v [kg \cdot m^{-3}]$ suchého vzduchu můžeme vyjádřit obdobně užitím stavové rovnice a Daltonova zákona, a to vztahem

$$\rho_v = \frac{p_v}{r_v \cdot T} = \frac{P - p_p}{r_v \cdot T}. \quad (3.7c)$$

Hustota vlhkého vzduchu $\rho [kg \cdot m^{-3}]$ je dána součtem hustot jeho složek, tedy vztahem

$$\rho = \rho_v + \rho_p. \quad (3.7d)$$

Relativní vlhkost $\varphi [-]$ je definována jako podíl hmotnosti vodní páry obsažené v objemové jednotce vlhkého vzduchu a hmotnosti vodní páry v objemové jednotce vlhkého vzduchu v případě, kdy by byl vzduch při stejné teplotě a celkovém tlaku parami nasycen [9]. Jinými slovy řečeno, relativní vlhkost je definována jako poměr hustoty vodní páry obsažené ve vlhkém vzduchu a hustoty syté vodní páry obsažené ve vlhkém vzduchu za téže teploty a celkového tlaku

$$\varphi = \frac{\rho_p}{\rho_p''}. \quad (3.8a)$$

S užitím stavové rovnice (3.5) můžeme relativní vlhkost vyjádřit vztahem

$$\varphi = \frac{\rho_p}{\rho_p''} = \frac{\frac{p_p}{r_p \cdot T}}{\frac{p_p''}{r_p \cdot T}} = \frac{p_p}{p_p''}. \quad (3.8b)$$

Relativní vlhkost je tedy dána podílem parciálního tlaku par p_p a parciálního tlaku sytých par p_p'' při dané teplotě. Hodnota φ se může pohybovat v intervalu $\langle 0;1 \rangle$. V prvním krajním případě, kdy $\varphi = 0$, je obsah vody ve vzduchu nulový a jde čistě o suchý vzduch. Ve druhém krajním případě, kdy $\varphi = 1$, jde o vzduch nasycený, neboť parciální tlak par p_p právě dosáhl hodnoty tlaku sytých par p_p'' .

Měrná vlhkost $x [kg \cdot kg_{s.v.}^{-1}]$ vyjadřuje hmotnostní podíl vody a suchého vzduchu, které spolu utváří vlhký vzduch. Lze ji tedy definovat vztahem

$$x = \frac{m_p + m_k + m_t}{m_v}. \quad (3.9a)$$

Pro nenasyčený vzduch platí $m_k = m_t = 0$ a vztah (3.9a) se redukuje. Užitím vztahů (3.3), (3.4), (3.5) a (3.8b) můžeme měrnou vlhkost nenasyčeného vzduchu vyjádřit vztahem

$$x = x_p = \frac{m_p}{m_v} = \frac{\frac{p_p \cdot V}{r_p \cdot T}}{\frac{p_v \cdot V}{r_v \cdot T}} = \frac{r_v}{r_p} \cdot \frac{p_p}{p_v} = \frac{r_v}{r_p} \cdot \frac{p_p}{p - p_p} = \frac{r_v}{r_p} \cdot \frac{\varphi \cdot p_p''}{p - \varphi \cdot p_p''}. \quad (3.9b)$$

Protože platí $p_p'' = p_p''(T)$, pak je měrná vlhkost nenasyčeného vzduchu x_p za konstantního celkového tlaku p funkcí relativní vlhkosti φ a teploty T , tedy $x_p(\varphi, T)$. Měrnou vlhkost nasyceného vzduchu x_p'' můžeme podle vztahu (3.9b) pro $\varphi = 1$ vyjádřit vztahem

$$x = x_p'' = \frac{r_v}{r_p} \cdot \frac{p_p''}{p - p_p''}. \quad (3.9c)$$

V tomto případě je měrná vlhkost x_p'' za konstantního celkového tlaku p funkcí pouze teploty T , tedy $x_p''(T)$. U přesyceného vzduchu mohou nastat tři situace. Při teplotě $t = t_{12}$ vlhký vzduch obsahuje páru, vodní kapičky a ledové krystalky. Měrnou vlhkost x přesyceného vzduchu lze v tomto případě určit ze vztahů (3.9a) a (3.9c). Ve vzduchu přitom předpokládáme právě takové množství páry, které odpovídá stavu nasycení při dané teplotě. Měrná vlhkost x je tedy určena součtem měrné vlhkosti syté páry x_p'' , měrné vlhkosti vodní mlhy x_k a měrné vlhkosti ledové mlhy x_t , matematicky formulováno

$$x = \frac{m_p'' + m_k + m_t}{m_v} = \frac{m_p''}{m_v} + \frac{m_k}{m_v} + \frac{m_t}{m_v} = x_p'' + x_k + x_t. \quad (3.9d)$$

Pokud pro teplotu t přesyceného vzduchu platí $t > t_{12}$, pak se ve vzduchu nevyskytují ledové krystalky, tedy $m_t = 0$ a tím pádem i $x_t = 0$. Měrná vlhkost x je potom dána vztahem

$$x = \frac{m_p'' + m_k}{m_v} = \frac{m_p''}{m_v} + \frac{m_k}{m_v} = x_p'' + x_k. \quad (3.9e)$$

Platí-li pro teplotu t přesyceného vzduchu $t < t_{12}$, pak se ve vzduchu nevyskytují vodní kapičky, tedy $m_k = 0$ a tím pádem i $x_k = 0$. Měrná vlhkost x je potom dána vztahem

$$x = \frac{m_p'' + m_t}{m_v} = \frac{m_p''}{m_v} + \frac{m_t}{m_v} = x_p'' + x_t. \quad (3.9f)$$

3.3 Entalpie vlhkého vzduchu

Protože se množství vlhkosti ve vzduchu často mění, je účelné vztahovat entalpii vlhkého vzduchu na 1 kg vzduchu suchého. Mluví se pak o měrné entalpii vlhkého vzduchu, ačkoli nejde o měrnou entalpii v pravém slova smyslu. Tato entalpie se totiž nevztahuje na 1 kg, nýbrž na $(1 + x)$ kg vlhkého vzduchu.

U entalpie ani u dalších stavových funkcí nelze stanovit jejich absolutní hodnotu, proto je pro vyčíslení jejich hodnot nezbytné stanovit si referenční stavy s nulovou entalpií. U suchého vzduchu předpokládáme nulovou entalpii při teplotě $t = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Považujeme-li dále suchý vzduch za ideální plyn o střední měrné tepelné kapacitě \bar{c}_{pv} , můžeme psát vztah pro entalpii suchého vzduchu $i_v [kJ \cdot kg_{s.v.}^{-1}]$ o teplotě t ve tvaru

$$i_v = \bar{c}_{pv} \cdot t. \quad (3.10)$$

U vody se předpokládá nulová entalpie kapalného skupenství v trojném bodě [2]. Pro zjednodušení vztahů pro výpočet entalpie se uvažuje $t_{tr} = 0,01\text{ }^{\circ}\text{C} \approx 0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Entalpii syté kapaliny $i_k [kJ \cdot kg^{-1}]$ o teplotě t lze za tohoto předpokladu vyjádřit vztahem

$$i_k = \bar{c}_k \cdot t. \quad (3.11)$$

Při vyjadřování entalpie vodní páry je na rozdíl od suchého vzduchu situace poněkud složitější. Chování páry se totiž poměrně vzdaluje chování ideálního plynu a její entalpie záleží nejen na teplotě, ale do značné míry i na parciálním tlaku par, tedy $i_p(t, p_p)$. Uvažujeme-li však pouze nízké p_p , pak je entalpie páry na parciálním tlaku téměř nezávislá, což ilustruje tabulka 3.1.

Tab. 3.1 Entalpie páry i_p v závislosti na parciálním tlaku p_p při $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ [2]

$p_p [Pa]$	$i_p [kJ \cdot kg^{-1}]$
611,657	2538,3
1000	2538,1
2000	2537,6

Předpokládáme tedy $i_p = i_p(t)$ a pokud je entalpie kapalného skupenství při teplotě t_{tr} nulová, pak entalpii páry $i_p [kJ \cdot kg^{-1}]$ můžeme vyjádřit jako součet tepla potřebného k vypaření kapaliny o teplotě $t_{tr} \approx 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ a tepla potřebného k následnému ohřevu páry na teplotu t , zapsáno vztahem

$$i_p = l_{23}(t_{tr}) + \bar{c}_{pp} \cdot t. \quad (3.12)$$

Z předpokladu, že je entalpie páry nezávislá na parciálním tlaku, dále vyplývá, že entalpie přehřáté i_p a syté páry $i_p'' [kJ \cdot kg^{-1}]$ o téže teplotě je stejná, platí tedy

$$i_p'' = i_p = l_{23}(t_{tr}) + \bar{c}_{pp} \cdot t. \quad (3.13)$$

Hodnotu entalpie tuhé fáze $i_t [kJ \cdot kg^{-1}]$ lze určit jako součet tepla potřebného k ztuhnutí kapaliny o teplotě $t_{tr} \approx 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ a tepla potřebného k následné změně teploty, zapsáno vztahem

$$i_t = -l_{12}(t_{tr}) + \bar{c}_t \cdot t. \quad (3.14)$$

Měrnou entalpii vlhkého vzduchu i $[kJ \cdot kg_{s.v.}^{-1}]$ určíme jako součet entalpií jeho složek. Nenasycený vzduch tvořený 1 kg suchého vzduchu a x_p kg přehřáté páry má tedy entalpii

$$\begin{aligned} i &= i_v + x_p \cdot i_p, \\ i &= \bar{c}_{pv} \cdot t + x_p \cdot [l_{23}(t_{tr}) + \bar{c}_{pp} \cdot t]. \end{aligned} \quad (3.15a)$$

Entalpie nenasyceného vzduchu je tedy funkcí teploty t a měrné vlhkosti přehřáté páry x_p . Obdobně entalpii nasyceného vzduchu tvořeného 1 kg suchého vzduchu a x_p'' kg syté páry lze formulovat vztahem

$$\begin{aligned} i &= i_v + x_p''(t) \cdot i_p, \\ i &= \bar{c}_{pv} \cdot t + x_p''(t) \cdot [l_{23}(t_{tr}) + \bar{c}_{pp} \cdot t]. \end{aligned} \quad (3.15b)$$

V tomto případě je entalpie pouze funkcí teploty, neboť $x_p'' = x_p''(t)$.

U vzduchu přesyceného mohou nastat tři situace. Pokud pro teplotu t platí $t > t_{12}$, pak je entalpie přesyceného vzduchu sestávajícího z 1 kg suchého vzduchu, x_p'' kg syté vodní páry a x_k kg kapalně fáze dána vztahem

$$\begin{aligned} i &= i_v + x_p''(t) \cdot i_p + x_k \cdot i_k, \\ i &= \bar{c}_{pv} \cdot t + x_p''(t) \cdot [l_{23}(t_{tr}) + \bar{c}_{pp} \cdot t] + x_k \cdot \bar{c}_k \cdot t. \end{aligned} \quad (3.15c)$$

Entalpie je v tomto případě tedy funkcí teploty t a měrné vlhkosti vodní mlhy x_k .

Jestliže pro teplotu t platí $t < t_{12}$, pak je entalpie přesyceného vzduchu sestávajícího z 1 kg suchého vzduchu, x_p'' kg syté vodní páry a x_t kg tuhé fáze dána vztahem

$$\begin{aligned} i &= i_v + x_p''(t) \cdot i_p + x_t \cdot i_t, \\ i &= \bar{c}_{pv} \cdot t + x_p''(t) \cdot [l_{23}(t_{tr}) + \bar{c}_{pp} \cdot t] + x_t \cdot [-l_{12}(t_{tr}) + \bar{c}_t \cdot t]. \end{aligned} \quad (3.15d)$$

Entalpie je v tomto případě tedy funkcí teploty t a měrné vlhkosti ledové mlhy x_t .

Pokud pro teplotu t platí $t = t_{12}$, lze entalpii přesyceného vzduchu tvořeného 1 kg suchého vzduchu, x_p'' kg syté vodní páry, x_k kg kapalně fáze a x_t kg tuhé fáze určit vztahem

$$\begin{aligned} i &= i_v + x_p''(t) \cdot i_p + x_k \cdot i_k + x_t \cdot i_t, \\ i &= \bar{c}_{pv} \cdot t + x_p''(t) \cdot [l_{23}(t_{tr}) + \bar{c}_{pp} \cdot t] + x_k \cdot \bar{c}_k \cdot t + x_t \cdot [-l_{12}(t_{tr}) + \bar{c}_t \cdot t]. \end{aligned} \quad (3.15e)$$

Hodnoty fyzikálních vlastností užitých ve vztazích (3.15a) až (3.15e) a v některých dalších vztazích udává tabulka 3.2.

Tab. 3.2 Fyzikální vlastnosti užitě pro výpočet entalpie vlhkého vzduchu

$\bar{c}_k = 4,187 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1},$	$\bar{c}_t = 2,09 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1},$
$\bar{c}_{pp} = 1,84 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1},$	$l_{12}(t_{tr}) = 333,4 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1},$
$\bar{c}_{pv} = 1,01 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1},$	$l_{23}(t_{tr}) = 2500,9 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}.$

3.4 Mollierův i - x diagram vlhkého vzduchu

Stav vlhkého vzduchu určují právě tři stavové veličiny. Jednou z nich obvykle bývá atmosférický tlak, tj. celkový tlak směsi p . Navíc tlak p se při mnohých změnách stavu vzduchu obvykle nemění (výjimkou je např. kompresorová technika, expanze v turbíně,...). Pro usnadnění výpočtů a znázorňování izobarických změn stavu vzduchu se v technické praxi používá i - x diagram. Ten pro daný celkový tlak p graficky znázorňuje závislost základních veličin vlhkého vzduchu (t , φ , x , i , p_p , ...). Tento diagram je pro lepší přehlednost zkonstruován v kosoúhlých souřadnicích. Původní diagram zkonstruoval Mollier v roce 1923 [2], a to tak, že v něm izoterma $t_{12}(p) \approx 0^\circ\text{C}$ byla kolmá k čarám konstantní měrné vlhkosti x . Rankin později sestrojil i - x diagram tak, že v něm izoentalpy a čáry konstantní měrné vlhkosti svírají úhel 135° [9]. Kromě $x = \text{konst.}$ a $i = \text{konst.}$ bývají v diagramu sestrojeny dále křivky $\varphi = \text{konst.}$, čáry $t = \text{konst.}$, $t_m = \text{konst.}$, $\rho = \text{konst.}$ aj.

Orientace v Mollierově i - x diagramu je naznačena na obr. 3.1. Na svislé ose je vynesena entalpie i . Body ležící přímo na této ose odpovídají měrné vlhkosti $x = 0 \text{ kg} \cdot \text{kg}_{\text{s.v.}}^{-1}$ a udávají tedy stav suchého vzduchu. Jak bylo zmíněno, hodnotu entalpie suchého vzduchu o teplotě $t = 0^\circ\text{C}$ považujeme za nulovou. Proto izoentalpa $i = 0 \text{ kJ} \cdot \text{kg}_{\text{s.v.}}^{-1}$ a izoterma t_{12} vychází z jednoho bodu. V diagramu na obrázku je to bod P , který je zároveň pólem diagramu (viz dále). Nyní se zaměříme na vzájemný sklon $x = \text{konst.}$ a $i = \text{konst.}$ pro případ, že izoterma t_{12} bude mít v oblasti nenasyčeného vzduchu vodorovný směr. Entalpie nenasyčeného vzduchu při $t = t_{12}(p) \approx 0^\circ\text{C}$ je dle (3.15a) dána vztahem $i = x_p \cdot l_{23}(t_{tr})$, jak je znázorněno i na obrázku. Tímto je dán vzájemný sklon čar $x = \text{konst.}$ a $i = \text{konst.}$. Měřítka měrné vlhkosti x se vynášejí na vodorovnou osu.

Křivka sytosti $\varphi = 1$ rozděluje diagram na oblast nenasyčeného a oblast přesyceného vzduchu. Do diagramu ji lze zanešt tak, že po krocích volíme teplotu t a dosazením do (3.9c) a (3.15b) dostáváme $x_p''(t)$ a odpovídající $i_p''(t)$. Postupně tak dostaneme celou křivku sytosti. Analogicky lze s využitím vztahů (3.9b) a (3.15a) vykreslit i ostatní křivky $\varphi = \text{konst.}$. Nepatrný zlom křivek konstantní relativní vlhkosti při teplotě t_{tr} je důsledkem různého průběhu tlaku sytých par nad vodní hladinou a nad ledem.

Na okraji diagramu bývá vyneseno směrové měřítko $\delta \left[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \right]$, které je definované vztahem

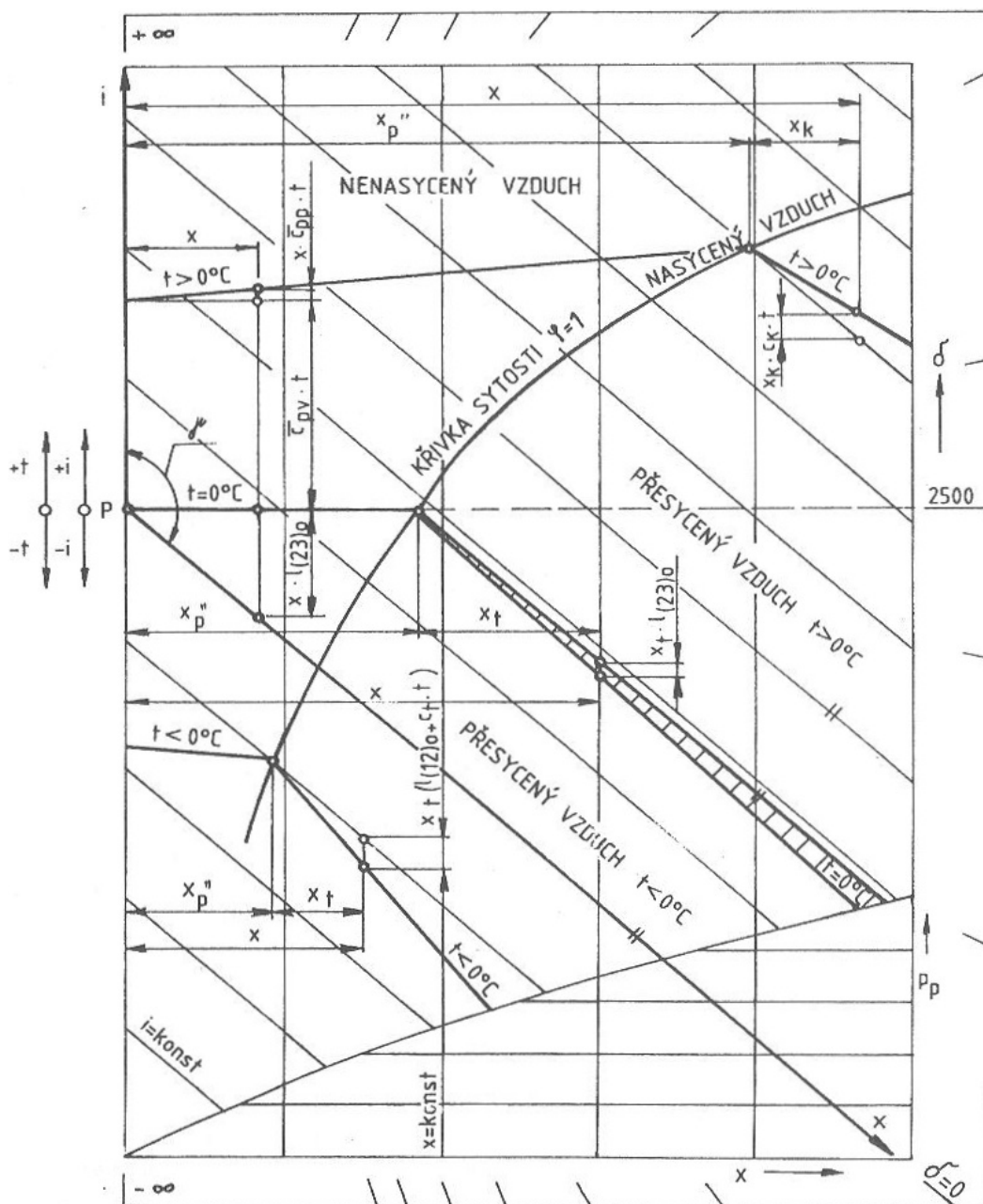
$$\delta = \frac{\partial i}{\partial x}. \quad (3.16)$$

Směrové měřítko hraje důležitou roli nejen při úpravách vzduchu. Udává směrnici přímků v diagramu a je svázáno s jeho pólem P .

Směrnice izoentalpy je dle definice pochopitelně $\delta = 0 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$, zatímco pro čáry konstantní měrné vlhkosti x je směrnice $\delta = \pm\infty \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Nyní se vraťme ještě k izotermám. V nenasyčené oblasti platí pro entalpii vztah (3.15a). Pokud do něj dosadíme příslušnou teplotu dostáváme lineární závislost entalpie na měrné vlhkosti. Ke konstrukci nám stačí dva body, takže dosadíme postupně $x = x_{\min}$ (x_{\min} je minimum rozsahu měřítka x) a $x = x_p''(t)$ a s pomocí výsledných entalpií můžeme izotermu sestrojit. Směrnice izotermy v nenasyčené oblasti je podle (3.15a) a (3.16) rovna

$$\delta = \frac{\partial i}{\partial x} = \bar{c}_{pp} \cdot t + l_{23}(t_{tr}). \quad (3.17)$$



Obr. 3.1 Mollierův $i - x$ diagram [9]

Pro teplotu $t = t_{12}(p) \approx 0^\circ\text{C}$ je tedy $\delta = l_{23}(t_{tr})$, jak je patrné i z obr. 3.1. Z rovnice rovněž vyplývá, že izotermy v nenasycené oblasti nejsou rovnoběžné, ale nepatrně se rozbíhají.

V oblasti přesyceného vzduchu postupujeme při konstrukci izotermy obdobně. Tentokrát dosazujeme $x = x_p''(t)$ a $x = x_{\max}$ (x_{\max} je maximum rozsahu měřítka x), a to s ohledem na teplotu t do rovnice (3.15c) nebo (3.15d).

Pokud pro teplotu t platí $t > t_{12}$, jde o vodní mlhu a užijeme rovnici (3.15c). Směrnici izotermy zde určíme pomocí vztahů (3.15c), (3.9e) a (3.16) následovně

$$\delta = \frac{\partial i}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} [\bar{c}_{pv} \cdot t + x_p''(t) \cdot [l_{23}(t_{tr}) + \bar{c}_{pp} \cdot t] + [x - x_p''(t)] \cdot \bar{c}_k \cdot t], \quad (3.18)$$

$$\delta = c_k \cdot t > 0.$$

Z výsledku plyne, že se izotermy budou odklánět od izoentalp směrem nahoru a že tento odklon vzrůstá společně s teplotou. Pokud budeme uvažovat teplotu $t = t_{12}(p) \approx 0^\circ\text{C}$, pak dostaneme směrnici horní větve izotermy $t = t_{12}(p) \approx 0^\circ\text{C}$, tedy $\delta = 0 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$. Tato větev je tedy rovnoběžná s izoentalpami.

V případě ledové mlhy, tedy když pro teplotu t platí $t < t_{12}$, užijeme rovnici (3.15d). Směrnici izotermy je zde možné určit pomocí vztahů (3.15d), (3.9f) a (3.16) následovně

$$\delta = \frac{\partial i}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} [\bar{c}_{pv} \cdot t + x_p''(t) \cdot [l_{23}(t_{tr}) + \bar{c}_{pp} \cdot t] + [x - x_p''(t)] \cdot [-l_{12}(t_{tr}) + \bar{c}_t \cdot t]], \quad (3.19)$$

$$\delta = c_t \cdot t - l_{12}(t_{tr}) < 0.$$

Z výsledku plyne, že se izotermy budou odklánět od izoentalp směrem dolů a že tento odklon vzrůstá s klesající teplotou. Pokud budeme uvažovat teplotu $t = t_{12}(p) \approx 0^\circ\text{C}$, pak dostaneme směrnici dolní větve izotermy $t = t_{12}(p) \approx 0^\circ\text{C}$, tedy $\delta = -l_{12}(t_{tr})$.

Složitější situace nastává v případě teploty $t = t_{12}$. Izoterma má v tomto případě v přesycené oblasti dvě větve a vytváří klín. V celé jeho ploše je teplota vzduchu $t = t_{12}(p) \approx 0^\circ\text{C}$ a jde o směs vodní a ledové mlhy. Rovnici horní větve této izotermy můžeme získat také tak, že ve vztahu (3.15e) položíme $x_t = 0$. Rovnici dolní větve můžeme získat také tak, že ve vztahu (3.15e) položíme s užitím vztahu (3.9f) $x_t = x - x_p''(t)$.

V diagramu bývají také zakresleny izotermy mezního adiabatického chlazení t_{ad} , což je teplota mokrého teploměru t_m . Teplota mokrého teploměru t_m je teplota, při které je veškeré teplo potřebné k odpařování či sublimaci vody dodáváno konvekci ze vzduchu. Pro teplotu mokrého teploměru $t_m \geq t_{12}(p)$ lze rovnici izotermy t_m určit ze vztahu (3.15c), a to tak, že položíme $t = t_m$, čímž dostaneme

$$i = \bar{c}_{pv} \cdot t_m + x_p''(t_m) \cdot [l_{23}(t_{tr}) + \bar{c}_{pp} \cdot t_m] + [x - x_p''(t_m)] \cdot \bar{c}_k \cdot t_m. \quad (3.20a)$$

Pro teplotu mokrého teploměru $t_m \leq t_{12}(p)$ lze rovnici izotermy t_m určit ze vztahu (3.15d), a to tak, že opět položíme $t = t_m$, čímž dostaneme

$$i = \bar{c}_{pv} \cdot t_m + x_p''(t_m) \cdot [l_{23}(t_{tr}) + \bar{c}_{pp} \cdot t_m] + [x - x_p''(t_m)] \cdot [-l_{12}(t_{tr}) + \bar{c}_t \cdot t_m]. \quad (3.20b)$$

Směrnici změny stavu vzduchu při jeho styku s vodní hladinou či ledovým povrchem o teplotě t_m lze vyjádřit s pomocí vztahů (3.16), (3.20a) a (3.20b) v následujícím tvaru

$$\delta = c_k \cdot t_m \quad \text{pro } t_m \geq t_{12}(p),$$

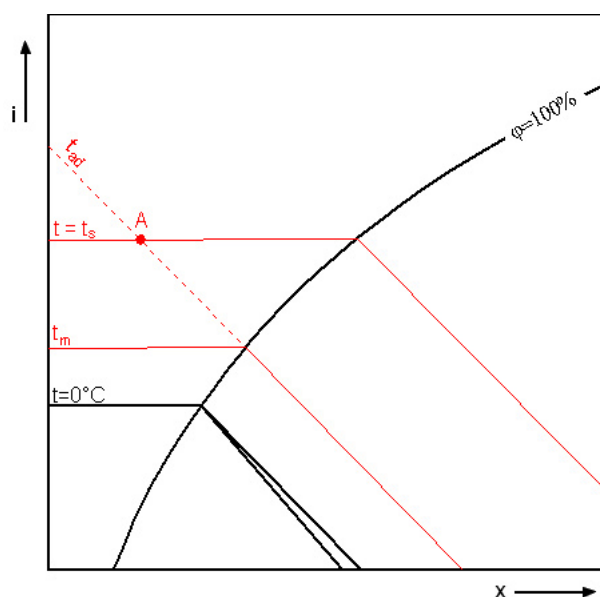
$$\delta = c_t \cdot t_m - l_{12}(t_{tr}) \quad \text{pro } t_m \leq t_{12}(p). \quad (3.21)$$

Tyto směrnice odpovídají směrnici izoterem t v oblasti přesyceného vzduchu. Izotermy t_{ad} tedy v $i-x$ diagramu získáme prodloužením izoterem t z oblasti přesyceného vzduchu do oblasti nenasyceného vzduchu.

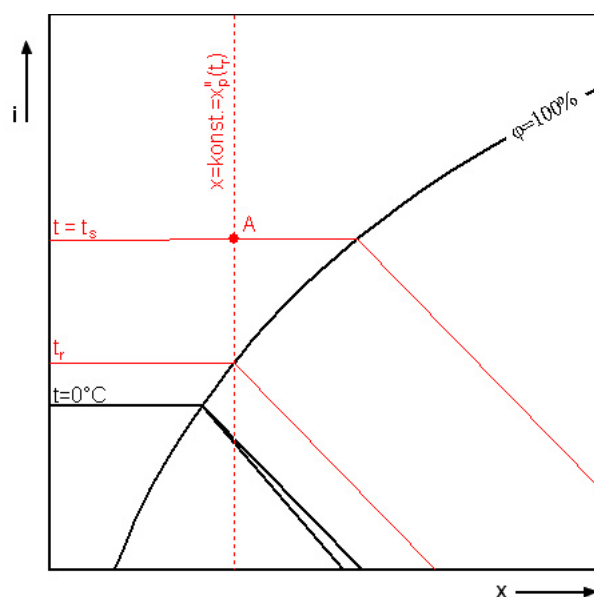
Ze známé teploty mokrého teploměru t_m a teploty (suchého) teploměru t (t_s) lze určit v $i-x$ diagramu stav vzduchu, jak ilustruje obr. 3.2. Tohoto principu využívá Assmannův aspirační psychrometr, jehož funkce je blíže popsána např. v [9], [10]. Podrobnější popis adiabatického odpařování z hladiny je uveden např. v [9].

V $i - x$ diagramu lze také vyobrazovat geometrická místa představující stavy se stejnou teplotou rosného bodu t_r , viz obr 3.3. Teplota rosného bodu t_r je teplota, při které začíná kondenzovat či desublimovat vodní pára při ochlazování nenasyčeného vzduchu [9]. Jinými slovy, na ochlazovaném tělese začne při určité teplotě povrchu tělesa docházet ke kondenzaci či desublimaci vodních par ze vzduchu. Povrch se orosí resp. ojíní a jeho teplotu prohlásíme za teplotu rosného bodu. V $i - x$ diagramu určíme teplotu rosného bodu pro daný stav tak, že jím vedeme čáru $x = konst.$ a hledáme její průsečík s křivkou nasycení $\varphi = 1$ (v následujících obrázcích uváděno jako $\varphi = 100\%$). Teplota rosného bodu odpovídá teplotě stavu získaného průsečíku.

Ze známé teploty rosného bodu t_r a teploty (suchého) teploměru $t = t_s$ lze opět určovat stav vzduchu. Na tomto principu pracují např. některé vlhkoměry, jejichž popis lze najít např. v [10].



Obr. 3.2 Určení stavu vzduchu z t_m a t_s



Obr. 3.3 K vysvětlení teploty rosného bodu t_r

4 Izobarické změny stavu vlhkého vzduchu

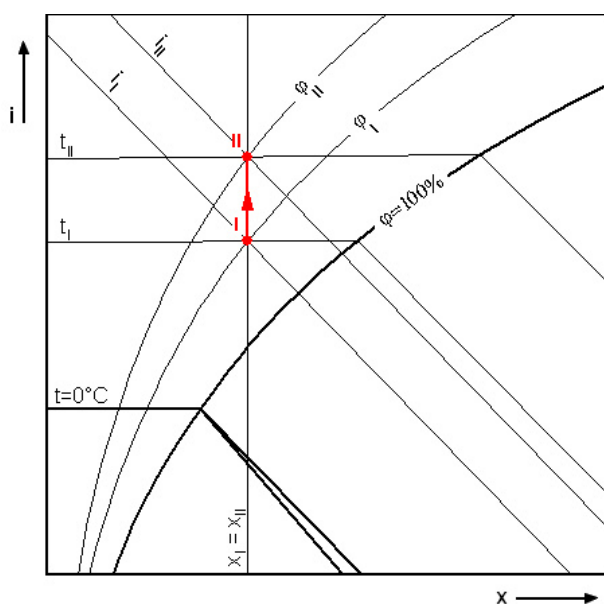
Budou nás zajímat čtyři základní úpravy vzduchu (ohřev, chlazení, míšení a vlhčení), které se aplikují v klimatizační technice. Jejich vhodnou kombinací můžeme vždy dosáhnout požadovaného stavu vzduchu. Také uvedeme popis změny stavu vzduchu v klimatizovaném prostoru, která je neodmyslitelnou součástí psychrometrického výpočtu.

Stavové veličiny před změnou budeme označovat indexem I a po změně indexem II . Výjimkou bude míšení, kde indexy I a II odpovídají stavům míšených proudů.

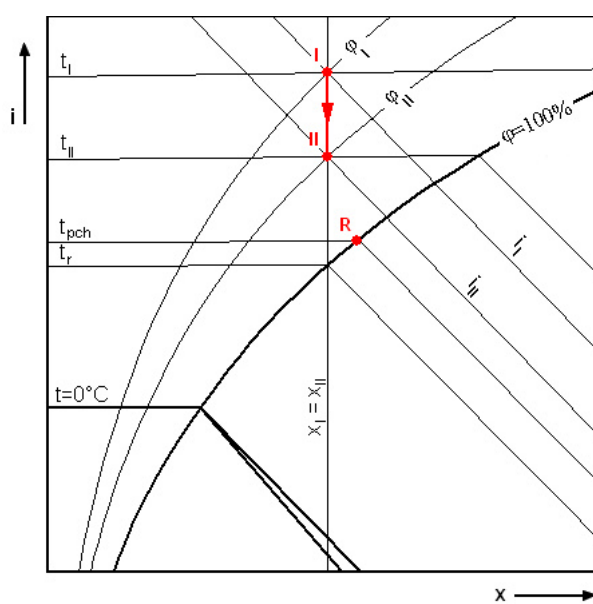
4.1 Ohřev

V klimatizačních zařízeních se k ohřevu vzduchu užívají výměníky tepla - ohřívače. Na obr. 4.1 je $i-x$ diagram, ve kterém je znázorněn ohřev vzduchu z teploty t_I na teplotu t_{II} . Při ohřevu dochází pouze k přenosu tepla, množství vody obsažené ve vzduchu se nemění a platí tedy $x_I = x_{II}$. Hodnota relativní vlhkosti však klesá, $\varphi_{II} < \varphi_I$. Protože $dx = 0$ a $di > 0$, pro směrnici ohřevu z rovnice (3.16) vyplývá $\delta = +\infty$. Výkon ohřívače $\dot{Q}_o [W]$, kterým protéká $\dot{m}_v [kg_{s.v.} \cdot s^{-1}]$, lze vyjádřit vztahem

$$\dot{Q}_o = \dot{m}_v \cdot (i_{II} - i_I) = \dot{m}_v \cdot c_{pv} \cdot (t_{II} - t_I). \quad (4.1)$$



Obr. 4.1 Ohřev v $i-x$ diagramu



Obr. 4.2 Suché chlazení v $i-x$ diagramu

4.2 Chlazení

Chlazení se v klimatizační technice opět realizuje pomocí výměníku tepla - chladiče. Na rozdíl od ohřívače v chladiči může docházet kromě přenosu tepla i k přenosu látky (vlhkosti). Zda k přenosu vlhkosti dojde nebo ne, záleží na vzájemném vztahu povrchové teploty chladiče t_{pch} a teploty rosného bodu t_r ochlazovaného vzduchu.

Pokud platí $t_{pch} \geq t_r$, pak vzduch protéká chladičem, aniž by docházelo k vysrážení vlhkosti na jeho povrchu. Tento případ chlazení bývá někdy nazýván také jako suché chlazení a je znázorněn v $i-x$ diagramu na obr. 4.2. V diagramu je také vyznačen bod R , což je rosný

bod chladiče. Stejně jako pro ohřev zde platí $x_I = x_{II}$ resp. $dx = 0$, a protože $di < 0$, pro směrnici suchého chlazení z rovnice (3.16) vyplývá $\delta = -\infty$. Protéká-li chladičem $\dot{m}_v [kg_{s.v.} \cdot s^{-1}]$, pak lze jeho výkon $\dot{Q}_{ch} [W]$ stanovit ze vztahu

$$\dot{Q}_{ch} = \dot{m}_v \cdot (i_{II} - i_I) = \dot{m}_v \cdot c_{pv} \cdot (t_{II} - t_I). \quad (4.2)$$

Pokud platí $t_{pch} < t_r$, pak při chlazení dochází ke kondenzaci vodní páry na povrchu chladiče. Tento případ chlazení bývá někdy nazýván také jako mokré chlazení a je znázorněn v $i-x$ diagramu na obr. 4.3. Změna stavu probíhá ve směru $I-R$ a dochází při ní kromě ochlazení i k odvlhčení. Množství vysrážené vlhkosti $\dot{m}_w [kg \cdot s^{-1}]$ lze vyjádřit vztahem

$$\dot{m}_w = \dot{m}_v \cdot (x_{II} - x_I). \quad (4.3)$$

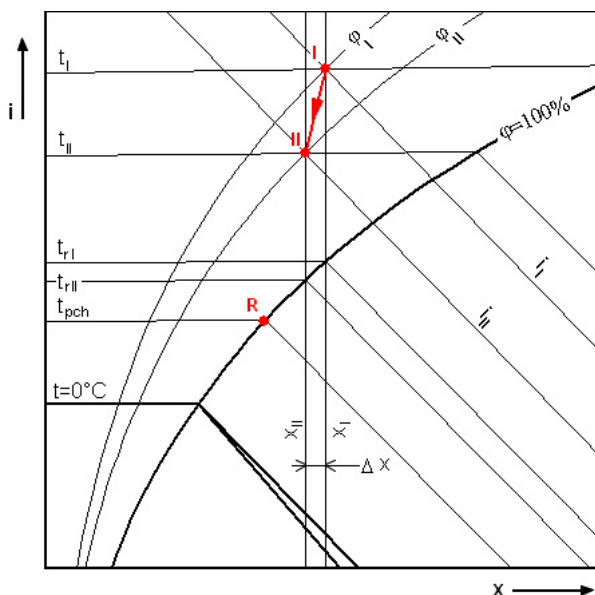
Výkon chladiče $\dot{Q}_{ch} [W]$ je daný vztahem

$$\dot{Q}_{ch} = \dot{m}_v \cdot (i_{II} - i_I). \quad (4.4)$$

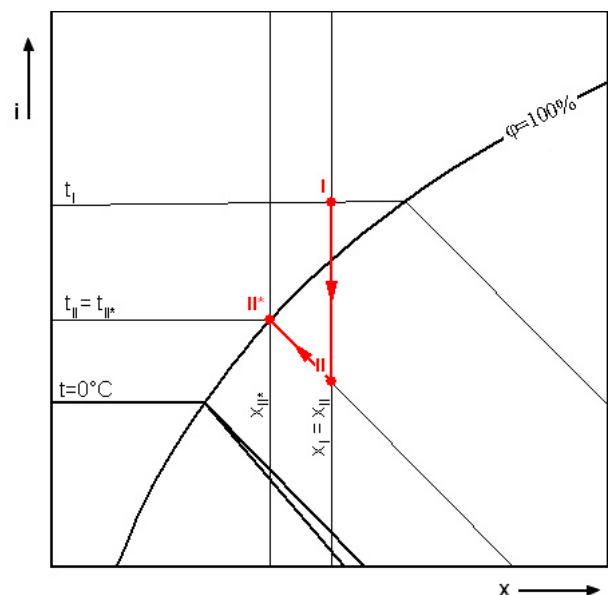
Pro směrnici mokrého chlazení platí

$$\delta = \frac{i_R - i_I}{x_R - x_I} = \frac{i_{II} - i_I}{x_{II} - x_I}. \quad (4.5)$$

Poznamenejme, že kdybychom drželi vzduch v chladiči až do okamžiku, kdy $t_{II} = t_{pch}$, dosáhli bychom maximálního možného ochlazení a také odvlhčení. Vzduch však chladičem pouze protéká a míra ochlazení či odvlhčení bývá vyjadřována účinností chladiče nebo obtokovým součinitelem. Tyto parametry závisí zejména na konstrukci chladiče.



Obr. 4.3 Mokré chlazení v $i-x$ diagramu



Obr. 4.4 Chlazení ve volném prostoru

Jiným druhem chlazení je chlazení ve volném prostoru (např. ochlazování atmosférického vzduchu [9]), viz obr 4.4. Tato změna probíhá při konstantní měrné vlhkosti x , platí tedy $\dot{m}_w = 0$. Chladicí výkon \dot{Q}_{ch} lze určit ze vztahu (4.2). Pokud stav

vzduchu po ochlazení II leží v přesycené oblasti, může dojít k vysrážení nadbytečné vlhkosti. Konečný stav vzduchu II^* je dán průsečíkem křivky nasycení s izotermou $t_{II} = t_{II^*}$. Obdobně může dojít k vysrážení vlhkosti i při ostatních úpravách vzduchu, leží-li upravený stav vzduchu v přesycené oblasti. Přitom pro tepelný tok \dot{Q} a hmotnostní tok odlučované vlhkosti \dot{m}_w platí vztahy

$$\dot{Q} = \dot{m}_v \cdot (i_{II^*} - i_{II}), \quad (4.6)$$

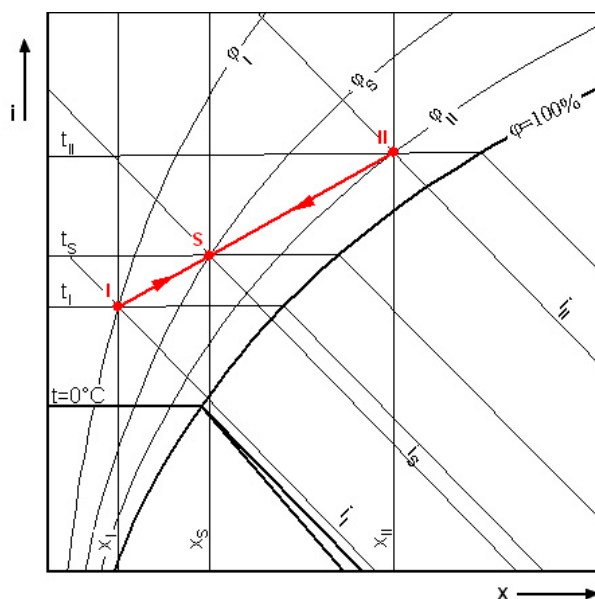
$$\dot{m}_w = \dot{m}_v \cdot (x_{II^*} - x_{II}). \quad (4.7)$$

4.3 Míšení

V $i-x$ diagramu na obr. 4.5 je znázorněn příklad míšení dvou proudů vzduchu. Mísíme při tom vzduch o stavu I a hmotnostním toku $\dot{m}_{vI} [kg_{s.v.} \cdot s^{-1}]$ se vzduchem o stavu II a hmotnostním toku $\dot{m}_{vII} [kg_{s.v.} \cdot s^{-1}]$. Dostáváme výsledný stav směsi S . Pro hmotnostní tok suchého vzduchu musí ze zákona zachování hmotnosti platit vztah

$$\dot{m}_{vS} = \dot{m}_{vI} + \dot{m}_{vII}. \quad (4.8)$$

Analogicky se zachovává množství vlhkosti, pro jejíž hmotnostní tok $\dot{m}_w [kg \cdot s^{-1}]$ platí



Obr. 4.5 Míšení v $i-x$ diagramu

$$\begin{aligned} \dot{m}_{wS} &= \dot{m}_{wI} + \dot{m}_{wII}, \\ \dot{m}_{vS} \cdot x_S &= (\dot{m}_{vI} + \dot{m}_{vII}) \cdot x_S = \dot{m}_{vI} \cdot x_I + \dot{m}_{vII} \cdot x_{II}. \end{aligned} \quad (4.9)$$

Pokud je míšení adiabatické a vzduch nekoná práci, platí pro entalpii směsi vztah

$$\begin{aligned} I_S &= I_I + I_{II}, \\ \dot{m}_{vS} \cdot i_S &= (\dot{m}_{vI} + \dot{m}_{vII}) \cdot i_S = \dot{m}_{vI} \cdot i_I + \dot{m}_{vII} \cdot i_{II}. \end{aligned} \quad (4.10)$$

Známe-li parametry a hmotnostní toky proudů vzduchu o stavech I a II , můžeme z rovnic (4.9) a (4.10) vyjádřit a určit x_S a i_S , čímž určíme stav směsi S . Užitím vztahů (4.9) a (4.10) lze také dokázat

$$\frac{\dot{m}_{vI}}{\dot{m}_{vII}} = \frac{i_{II} - i_S}{i_S - i_I} = \frac{x_{II} - x_S}{x_S - x_I}, \quad \delta_{I-S} = \frac{i_S - i_I}{x_S - x_I} = \frac{i_{II} - i_S}{x_{II} - x_S} = \delta_{S-II}. \quad (4.11)$$

Z toho vyplývá, že stav směsi S leží v diagramu na úsečce spojující stavy I a II . Tuto úsečku nazýváme směšovací úsečkou.

4.4 Vlhčení

Za zvláštní případ míšení lze považovat vlhčení. Dochází při něm totiž k míšení vzduchu a vlhkosti, jejíž měrná vlhkost je zřejmě $x_w = \infty$ a jejíž stav tudíž v $i - x$ diagramu nenalezneme.

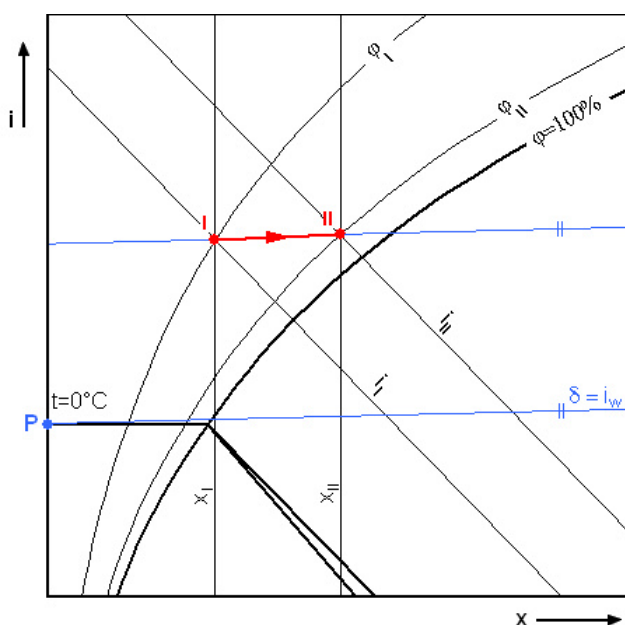
Množství suchého vzduchu se při vlhčení nemění, a proto platí $\dot{m}_{vI} = \dot{m}_{vII} = \dot{m}_v$. Přivádíme-li do vzduchu o stavu I hmotnostní tok vlhkosti \dot{m}_w $[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$ o entalpii i_w $[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}]$, platí následující bilance

$$\dot{m}_{wII} = \dot{m}_{wI} + \dot{m}_w, \quad (4.12)$$

$$\dot{m}_v \cdot x_{II} = \dot{m}_v \cdot x_I + \dot{m}_w,$$

$$I_{II} = I_I + I_w, \quad (4.13)$$

$$\dot{m}_v \cdot i_{II} = \dot{m}_v \cdot i_I + \dot{m}_w \cdot i_w.$$



Obr. 4.6 Vlhčení v $i - x$ diagramu

Z rovnic (4.12) a (4.13) lze tedy vyjádřit x_{II} a i_{II} , čímž je stav II určen. Příklad vlhčení vzduchu znázorňuje obr. 4.6.

Pro směrnici vlhčení vzduchu z rovnic (4.12) a (4.13) plyne

$$\delta = \frac{i_{II} - i_I}{x_{II} - x_I} = \frac{\frac{\dot{m}_w \cdot i_w}{\dot{m}_v}}{\frac{\dot{m}_w}{\dot{m}_v}} = i_w \quad (4.14)$$

Známe-li tedy entalpii vlhčícího média i_w , můžeme určit směr vlhčení. V diagramu se toto provede tak, že se spojí pól P s hodnotou odpovídající entalpii i_w na okrajovém měřítku δ . Tím je znám směr vlhčení, který se vede bodem odpovídajícím stavu I .

Podle skupenství vlhčícího média rozlišujeme vlhčení vodou a parou. Entalpii vody lze stanovit z rovnice (3.11), entalpie páry je tabelována nebo ji lze určit z $i - s$ diagramu vody. V praxi se pro zjednodušení při vlhčení vodou považuje $i_w \approx 0$ a směr vlhčení je pak totožný se směrem izoentalty. Obdobně vlhčení sytou nebo mírně přehřátou párou se zjednodušeně považuje za děj izotermický.

4.5 Změna stavu vzduchu v klimatizovaném prostoru

Kromě směrového měřítka můžeme na horním okraji některých diagramů nalézt také stupnici tzv. faktoru citelného tepla ϑ $[-]$. Ten slouží zejména k výpočtům v oboru klimatizace. Směr změny stavu vzduchu v klimatizovaném prostoru (dále jen KP) udává faktor citelného tepla KP, který je definován vztahem

$$\vartheta_i = \frac{\dot{Q}_{ic}}{\dot{Q}_i} = \frac{\dot{Q}_{ic}}{\dot{Q}_{ic} + \dot{Q}_{iv}}, \quad (4.15)$$

kde $\dot{Q}_i [W]$ představuje celkový tepelný zisk (v letním provozu) nebo ztrátu (v zimním provozu) KP, $\dot{Q}_{ic} [W]$ představuje tepelný zisk nebo ztrátu citelným teplem a $\dot{Q}_{iv} [W]$ tepelný zisk nebo ztrátu vázaným teplem. Přitom pro jednotlivé tepelné toky platí vztahy

$$\dot{Q}_i = \dot{m}_v \cdot (i_I - i_P), \quad (4.16)$$

$$\dot{Q}_{ic} = \dot{m}_v \cdot c_{pv} \cdot (t_I - t_P), \quad (4.17)$$

$$\dot{Q}_{iv} = \dot{m}_w \cdot l_{23} = \dot{m}_v \cdot (x_I - x_P) \cdot l_{23}, \quad (4.18)$$

kde $\dot{m}_v [kg_{s.v.} \cdot s^{-1}]$ představuje hmotnostní tok suchého vzduchu přiváděného do KP a $\dot{m}_w [kg \cdot s^{-1}]$ hmotnostní tok vznikající vlhkosti v KP. Indexy I, P zde označují veličiny vztažené ke stavu vzduchu v místnosti resp. stavu vzduchu do KP přiváděného.

Mezi faktorem citelného tepla ϑ_i a směrovým měřítkem δ_i lze na základě rovnic (3.16) a (4.15) až (4.18) určit vztah

$$\vartheta_i = \frac{\dot{Q}_{ic}}{\dot{Q}_i} = \frac{\dot{Q}_i - \dot{Q}_{iv}}{\dot{Q}_i} = 1 - \frac{\dot{m}_v \cdot (x_I - x_P) \cdot l_{23}}{\dot{m}_v \cdot (i_I - i_P)} = 1 - \frac{l_{23}}{\delta_i}. \quad (4.19)$$

Na základě tohoto vztahu nám tedy postačí dále pracovat jen se směrovým měřítkem δ_i , které můžeme ze vztahu (4.19) vyjádřit ve tvaru

$$\delta_i = \frac{\dot{Q}_{iv}}{\dot{Q}_{ic} + \dot{Q}_{iv}} \cdot l_{23} = \frac{i_I - i_P}{x_I - x_P}. \quad (4.20)$$

Při řešení změny stavu v KP předpokládáme, že známe tepelné zisky či ztráty citelným \dot{Q}_{ic} a vázaným \dot{Q}_{iv} teplem a také požadovaný stav vzduchu v místnosti, tj. parametry stavu I . Úkolem bývá určit stav přiváděného vzduchu P , popř. jeho potřebné množství.

V letním provozu se do KP přivádí vzduch chladnější než je vzduch v místnosti. Teplota přiváděného vzduchu nesmí být příliš nízká, proto se obvykle volí pracovní rozdíl teplot $\Delta t_{prac} [K]$, definovaný vztahem

$$\Delta t_{prac} = t_I - t_P. \quad (4.21)$$

V $i-x$ diagramu tedy hledáme průsečík směrnice δ_i s izotermou t_P . Numerické řešení provedeme tak, že ze vztahů (4.17) a (4.21) určíme hmotnostní tok suchého vzduchu \dot{m}_v , který následně dosadíme do rovnic (4.16) a (4.18). Dostaneme tak entalpii i_P a měrnou vlhkost x_P , čímž je stav přiváděného vzduchu P určen. Na vypočtený hmotnostní tok suchého vzduchu \dot{m}_v se také dimenzuje ventilátor klimatizačního zařízení.

V zimním provozu nevycházíme z pracovního rozdílu teplot Δt_{prac} , nýbrž ze známého hmotnostního toku suchého vzduchu \dot{m}_v , který byl vypočten pro letní provoz. Je to důsledek toho, že přívod teplého vzduchu v zimě nemá nežádoucí vliv na tepelnou pohodu, jako má přívod příliš chladného vzduchu v létě. Ze známého hmotnostního toku suchého vzduchu \dot{m}_v s využitím rovnic (4.16) a (4.18) určíme entalpii i_P a měrnou vlhkost x_P , čímž je stav přiváděného vzduchu P určen. Problematikou úprav vzduchu a podrobným popisem jednotlivých částí klimatizačního zařízení se zabývá např. [4], [7].

5 Procedury určování stavů vlhkého vzduchu

Stav vlhkého vzduchu se zadává celkovým tlakem p a dvojicí vybraných stavových veličin, mezi které patří teplota t , relativní vlhkost φ , měrná vlhkost x , měrná entalpie i , teplota mokrého teploměru t_m a teplota rosného bodu t_r . Z toho vyplývá, že existuje 15 kombinací stavových veličin, kterými může být stav zadán, jak ilustruje následující schéma:

p, t, φ				
p, t, x	p, φ, x	p, x, i		
p, t, i	p, φ, i	p, x, t_m	p, i, t_m	
p, t, t_m	p, φ, t_m	p, x, t_r	p, i, t_r	p, t_m, t_r
p, t, t_r	p, φ, t_r			

Pro každou kombinaci zadávaných veličin byla vytvořena samostatná procedura, která dopočítá zbylé nezadané stavové veličiny. Každá procedura vykreslí $i-x$ diagram vlhkého vzduchu pro zadaný celkový tlak p (vždy je vykreslena křivka nasycení $\varphi=1$ a izoterma t_{12}), dále vykreslí izočáry zadaných stavových veličin a vyznačí určený stav (pokud byl nalezen). Kromě zmíněných stavových veličin se také určuje:

- parciální tlak sytých par p_p'' ze vztahu (2.2a-d) pro $t \geq t_{tr}$ nebo ze vztahu (2.3a-d) pro $t < t_{tr}$,
- hustota sytých par ρ_p'' ze vztahu (3.7b),
- měrná vlhkost nasyceného vzduchu x_p'' ze vztahu (3.9c),
- měrná entalpie nasyceného vzduchu i_p'' ze vztahu (3.15b),
- parciální tlak vodních par p_p ze vztahu (3.8b),
- hustota vodních par ρ_p ze vztahu (3.7a),
- hustota suchého vzduchu ρ_v ze vztahu (3.7c),
- hustota vlhkého vzduchu ρ ze vztahu (3.7d),
- měrná vlhkost nenasyčeného vzduchu x_p ze vztahu (3.9b),
- měrná vlhkost vodní mlhy x_k ze vztahu (3.9e),
- měrná vlhkost ledové mlhy x_l ze vztahu (3.9f).

Poznamenejme, že pokud se stav vzduchu nachází v přesycené oblasti v klínu izoterm $t = t_{12}$, pak je k výpočtu měrné vlhkosti ledové x_l a vodní x_k mlhy využito také vztahů (3.15e) a (3.9d).

Procedury mají dále společné to, že před samotným výpočtem se kontrolují zadané hodnoty. Ty musí náležet do rozsahů zvolených vzhledem k použitým konstantám a hodnotám fyzikálních veličin. Jinak řečeno, pokud program počítá např. s hodnotou střední měrné tepelné kapacity suchého vzduchu \bar{c}_{pv} , která byla stanovena pro teplotní interval $(t_{\min}; t_{\max})$, pak by měla zadaná hodnota teploty vzduchu t náležet do tohoto teplotního intervalu. Stejně je tomu i u ostatních zadávaných veličin. Obdobná kontrola je aplikována i na vypočtené hodnoty, které musí rovněž náležet do uvedených rozsahů. Základní nastavení povolených rozsahů hodnot a způsob změny těchto rozsahů je uveden v příloze Návod k obsluze programu Vlhký vzduch 3.0.

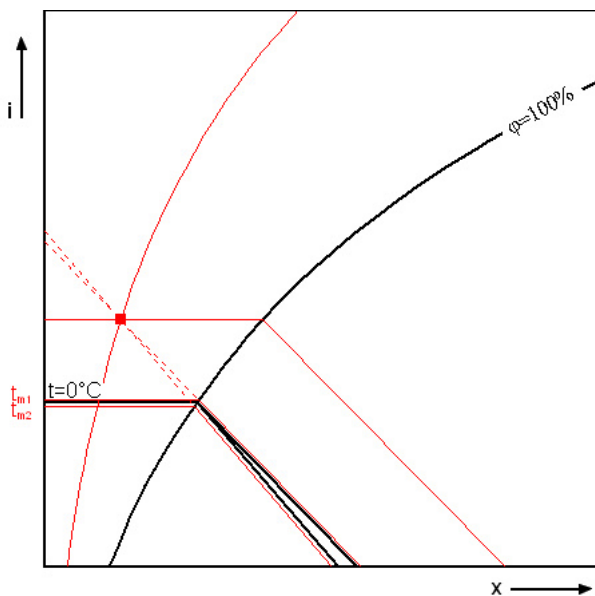
5.1 Procedura p, t, φ

Je-li zadána relativní vlhkost φ , pak jde o stav nenasyčený ($\varphi < 1$) nebo nasycený ($\varphi = 1$). Nejprve se určuje měrná vlhkost $x = x_p$ resp. $x = x_p''$, a to ze vztahů (3.9b) resp. (3.9c). Dále je počítána entalpie i ze vztahu (3.12) resp. (3.13). Teplotu mokrého teploměru t_m je vzhledem ke tvaru rovnic (3.20a), (3.20b) nutné určit iteračně. V důsledku různého sklonu izoterem v oblasti přesyceného vzduchu může nastat situace, kdy danému stavu lze přisoudit celý interval teplot mokrého teploměru $\langle t_{m2}; t_{m1} \rangle$, viz obr. 5.1. Rovněž teplota rosného bodu t_r se určuje iteračně.

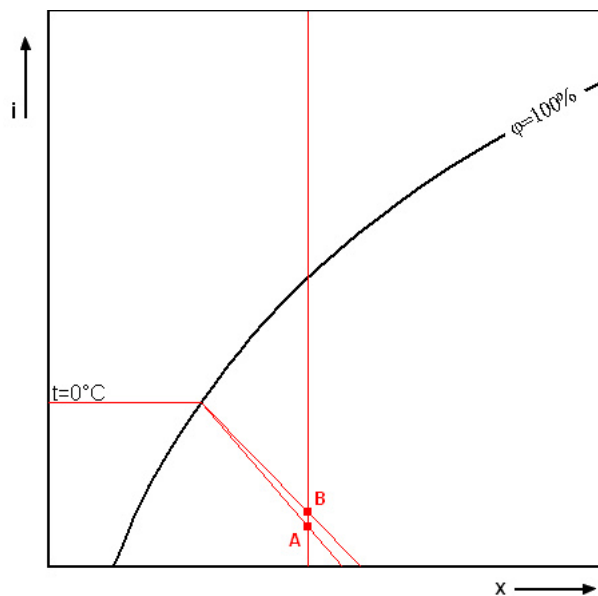
Vzhledem k tomu, že v problematice vlhkého vzduchu nelze některé problémy řešit exaktně, uvedeme názorný příklad iteračního výpočtu, a to právě při určování teploty rosného bodu t_r . Hledáme takovou teplotu rosného bodu t_r , pro kterou dle rovnice (3.9c) platí vztah

$$x_p(t = t_r, \varphi = 1) = x_p''(t_r) = \frac{r_v}{r_p} \cdot \frac{p_p''(t_r)}{p - p_p''(t_r)}. \quad (5.1)$$

Z tohoto vztahu můžeme snadno vyjádřit parciální tlak sytých par $p_p''(t_r)$, nicméně vyjádřit samotnou teplotu rosného bodu t_r ze vztahů (2.2) nebo (2.3) exaktně nelze (výjimkou jsou vztahy (2.2c) a (2.3c)). Proto program postupuje následovně. Pro první iteraci zvolí teplotu rosného bodu $t_r = t_r' = t_{r\min}$, kde t_r' je proměnná hodnota pro iterační řešení a $t_{r\min}$ minimum povoleného rozsahu hodnot t_r . V každé iteraci se ze vztahů (2.2) nebo (2.3) spočte parciální tlak sytých par $p_p''(t_r')$, jehož hodnota se porovnává se skutečnou hodnotou parciálního tlaku sytých par $p_p''(t_r)$. Dokud pro hodnoty parciálních tlaků sytých par platí $p_p''(t_r') < p_p''(t_r)$, program přičítá v každé iteraci $t_r' = t_r' + 10^\circ\text{C}$. V okamžiku, kdy nastane $p_p''(t_r') > p_p''(t_r)$, program odečítá v každé iteraci $t_r' = t_r' - 1^\circ\text{C}$. V okamžiku, kdy nastane $p_p''(t_r') < p_p''(t_r)$, program přičítá v každé iteraci $t_r' = t_r' + 0,1^\circ\text{C}$. Analogickým postupem program zpřesňuje hodnotu teploty rosného bodu t_r' v řádech setin, tisícín, desetitisícín, kdy je hodnota t_r' již dostatečně přesná a prohlásíme ji za skutečnou hodnotu teploty rosného bodu $t_r \approx t_r'$.



Obr. 5.1 Příklad nejednoznačné teploty mokrého teploměru t_m



Obr. 5.2 Neurčitý stav procedury „ p, t, x “

5.2 Procedura p, t, x

Pokud pro zadanou hodnotu měrné vlhkosti platí $x \leq x_p''(t)$, pak se jedná o vzduch nenasycený nebo nasycený. V tomto případě se určí relativní vlhkost φ užitím vztahu (3.9b) a další výpočty se provádí stejným způsobem jako v proceduře „ p, t, φ “.

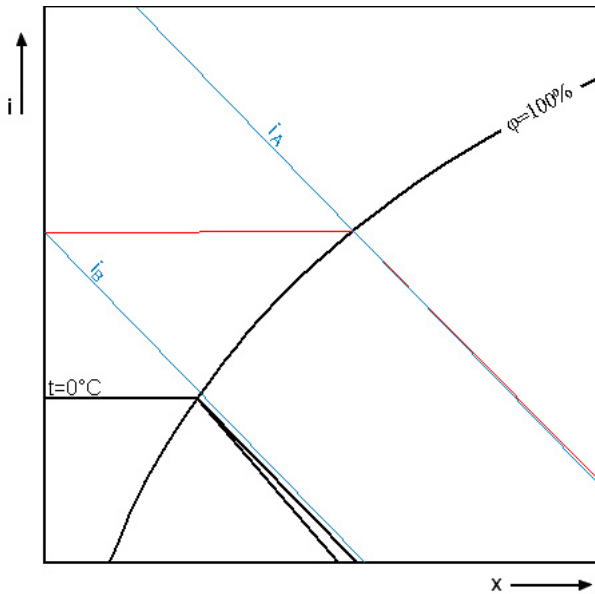
V opačném případě se jedná o vzduch přesycený. V této oblasti pro teplotu mokrého teploměru platí $t_m = t$. Teplotu rosného bodu t_r určujeme opět již zmíněným iteračním postupem. Entalpii přesyceného vzduchu určujeme s ohledem na vztah mezi zadanou hodnotou teploty t a teplotou tání $t_{12}(p)$, kterou určíme ze vztahu (2.4b). Když pro zadanou teplotu platí $t > t_{12}$, pak jde o vodní mlhu a entalpii určíme ze vztahu (3.15c). Jestliže zadaná teplota $t < t_{12}$, pak jde o ledovou mlhu a entalpii určíme ze vztahu (3.15d). V případě, že zadaná teplota $t = t_{12}$, pak jde o stav neurčitý, jak je zobrazeno na obr 5.2. Řešením je v tomto případě celý interval bodů ležících na čáře $x = konst.$ a zároveň uvnitř klínu izotermy t_{12} . Interval entalpií $\langle i_A; i_B \rangle$ stanovíme z rovnice (3.15e) následovně. Pro bod A ležící na dolní větvi izotermy t_{12} platí zřejmě pro měrnou vlhkost ledové mlhy $x_i = x - x_p''(t)$ a dosazením do vztahu (3.15e) dostáváme spodní hranici intervalu, tedy entalpii i_A . Obdobně pro bod B ležící na horní větvi izotermy platí pro měrnou vlhkost ledové mlhy $x_i = 0$ a z (3.15e) dostaneme horní hranici intervalu, entalpii i_B .

5.3 Procedura p, t, i

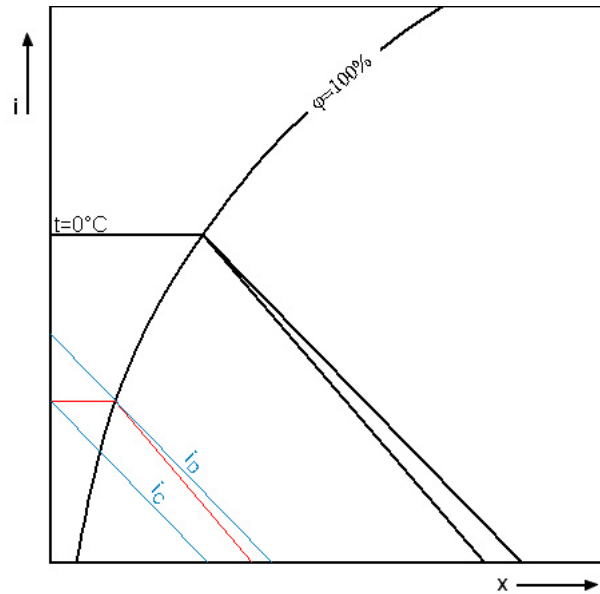
Pro teploty $t > t_{12}$ mohou nastat tři situace. V obr. 5.3 jsou vyznačeny pro danou teplotu t izoentalpy i_A a i_B , pomocí kterých tyto situace odlišíme. Hodnotu entalpie i_A určíme z rovnice (3.15b) pro danou teplotu t . Hodnotu entalpie i_B určíme z rovnice (3.15a) pro danou teplotu t a měrnou vlhkost $x = 0$. Pokud je zadaná hodnota entalpie $i < i_B$, pak stav vzduchu nelze v diagramu najít, neboť se izoterma t s izoentalpou i neprotínají (v oblasti přesyceného vzduchu se izoterma t s izoentalpou i rozbíhají). Pokud pro entalpii i platí $i_B \leq i \leq i_A$, jde o vzduch nenasycený či nasycený, z rovnice (3.15a) resp. (3.15b) určíme měrnou vlhkost $x = x_p$ resp. $x = x_p''$ a dále řešíme ve smyslu procedury „ p, t, x “. Pokud je entalpie $i > i_A$, pak se protíná izoterma t s izoentalpou i v oblasti přesyceného vzduchu, konkrétně v oblasti vodní mlhy. Ze vztahu (3.15c) určíme měrnou vlhkost vodní mlhy x_k a následně měrnou vlhkost $x = x_p''(t) + x_k$. Další řešení je analogické s procedurou „ p, t, x “.

Pro teploty $t < t_{12}$ mohou nastat čtyři situace. V obr. 5.4 jsou vyznačeny pro danou teplotu t izoentalpy i_C a i_D , pomocí kterých tyto situace odlišíme. Hodnotu entalpie i_C určíme z rovnice (3.15a) pro danou teplotu t a měrnou vlhkost $x = 0$. Hodnotu entalpie i_D určíme z rovnice (3.15b) pro danou teplotu t . Pokud je zadána hodnota entalpie $i > i_D$, pak stav vzduchu nelze v diagramu najít, neboť se izoterma t s izoentalpou i neprotínají. Pokud je zadaná hodnota entalpie $i = i_D$, pak jde o vzduch nasycený a lze aplikovat postup uvedený v proceduře „ p, t, φ “, přičemž $\varphi = 1$. Pokud pro entalpii i platí $i_C \leq i < i_D$, protíná se izoterma t s izoentalpou i ve dvou bodech a jde tedy o stav nejednoznačný. Jeden průsečík odpovídá nenasycenému stavu vzduchu a příslušnou hodnotu měrné vlhkosti $x = x_p$ určíme ze vztahu (3.15a). Druhý průsečík leží v oblasti přesyceného vzduchu (ledové mlhy) a

z rovnice (3.15d) určíme nejdříve měrnou vlhkost ledové mlhy x_l a následně měrnou vlhkost $x = x_p''(t) + x_l$. Oba průsečíky je dále možné řešit stejně jako v proceduře „ p, t, x “. Pokud entalpie $i < i_C$, pak se izoterma t protíná s izoentalpou i pouze v oblasti přesyceného vzduchu (ledové mlhy). Z rovnice (3.15d) vypočteme měrnou vlhkost ledové mlhy x_l a následně měrnou vlhkost $x = x_p''(t) + x_l$. Postup výpočtu ostatních veličin je shodný s procedurou „ p, t, x “.

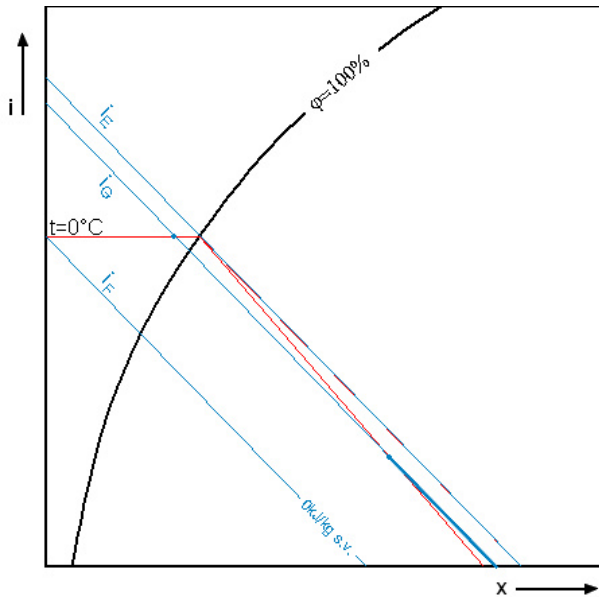


Obr. 5.3 K popisu procedury „ p, t, i “

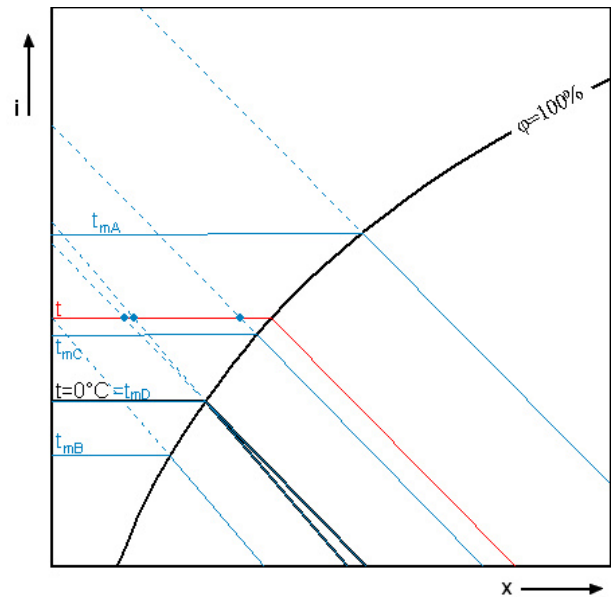


Obr. 5.4 K popisu procedury „ p, t, i “

Pokud je zadána teplota $t = t_{12}$, mohou nastat rovněž čtyři situace. V obr. 5.5 jsou vyznačeny izoentalpy i_E a i_F , pomocí kterých tyto situace odlišíme. Hodnotu entalpie i_F určíme z rovnice (3.15a) pro danou teplotu $t = t_{12}$ a pro měrnou vlhkost $x = 0$. Hodnotu entalpie i_E určíme z rovnice (3.15b) pro teplotu $t = t_{12}$. Pokud je zadána hodnota entalpie $i > i_E$, pak stav vzduchu nelze v diagramu nalézt, neboť se izoterma t s izoentalpou i neprotínají. Pokud je zadána hodnota entalpie $i = i_E$, pak jsou řešením všechny stavy ležící na horní větvi izotermy t_{12} , což je důsledek toho, že tato větev má stejnou směrnici jako mají izoentalpy. Jde tedy o stav nejednoznačný. Pokud pro entalpii i platí $i_F \leq i < i_E$, pak jde rovněž o stav nejednoznačný. Na obr. 5.5 je tento případ ilustrován na příkladu izoentalpy i_G . Kromě stavu v nenasyčené oblasti jsou řešením všechny stavy ležící na dané izoentalpě a zároveň v klínu izotermy t_{12} . Měrnou vlhkost x průsečíků izoentalpy i_G s izotermou t_{12} a izoentalpy i_G s dolní větví izotermy t_{12} lze stanovit obdobně jako v případě, kdy teplota $t < t_{12}$ a entalpie $i_C \leq i < i_D$. Další výpočty jsou analogické s procedurou „ p, t, x “. V posledním případě, kdy $i < i_E$, jsou řešením stavy ležící na dané izoentalpě i a současně v klínu izotermy t_{12} . Jde tedy opět o stav nejednoznačný. Zde lze rovněž určit měrnou vlhkost x odpovídající průsečíku izoentalpy i a dolní větve izotermy t_{12} a následně postupovat jako v proceduře „ p, t, x “.



Obr. 5.5 K popisu procedury „ p, t, i “



Obr. 5.6 K popisu procedury „ p, t, t_m “

5.4 Procedura p, t, t_m

Pokud pro zadané hodnoty platí $t = t_m$, pak je řešením nasycený vzduch a všechny stavy náležící izotermě $t = t_m$ v oblasti přesyceného vzduchu. Ve speciálním případě, kdy $t = t_m = t_{12}$, jsou řešením všechny stavy vzduchu ležící v klínu izotermu t_{12} .

Situace, které mohou nastat v případě, že $t \neq t_m$, znázorňuje obr. 5.6. Pokud pro zadané hodnoty platí $t_m > t$, pak stav nelze najít. Tuto situaci ilustruje na obr. 5.6 teplota t a teplota mokrého teploměru t_{mA} .

Pokud pro zadanou hodnotu teploty mokrého teploměru t_m platí $t_{mB} < t_m < t$, pak měrnou vlhkost x hledaného stavu určíme užitím rovnic (3.15a) a (3.20a) nebo (3.20b). Dále pak pokračujeme ve výpočtu jako v proceduře „ p, t, x “. Této popsané situaci odpovídá na obrázku teplota t a teplota mokrého teploměru t_{mC} . Zvláštní případ nastane, jestliže teplota mokrého teploměru $t_m = t_{12}$. Tento případ ilustruje izoterma t a teplota mokrého teploměru t_{mD} na obr. 5.6. Dostaneme totiž průsečíky dva, pro které opět můžeme určit měrnou vlhkost x užitím vztahů (3.15a) a (3.20a) nebo (3.20b). Řešením jsou v tomto případě všechny body na izotermě t ohraničené právě zmíněnými dvěma průsečíky, jde tedy o stav nejednoznačný. Konečně v případě, kdy $t_m < t_{mB}$, není možné stav v diagramu nalézt.

Poznamenejme, že izoterma t_{mB} je zde pouze ilustrační, ve skutečnosti je k posouzení koincidence izoterm t a t_m užito porovnání hodnot entalpií pro $x = 0$ dle vztahů (3.15a) a (3.20a), příp. (3.20b).

5.5 Procedura p, t, t_r

Užitím vztahu (3.9c) určíme měrnou vlhkost $x = x_p''(t_r)$. Dále postupujeme obdobně jako v proceduře „ p, t, x “.

5.6 Procedura p, φ, x

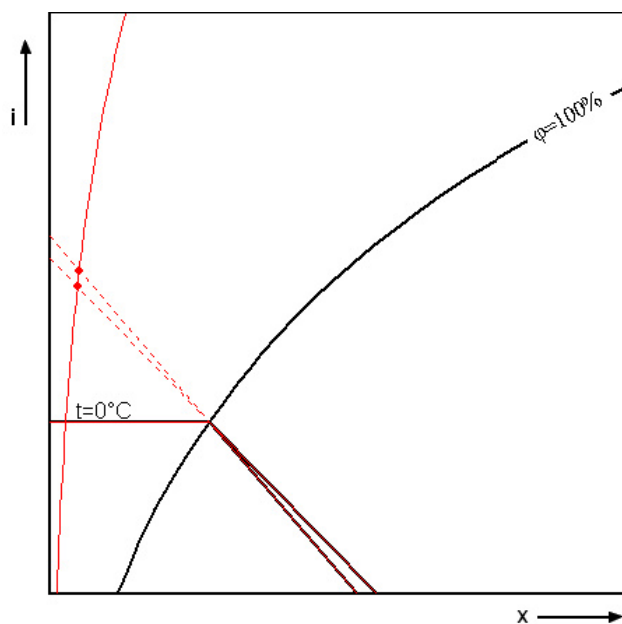
Nejednoznačný stav nastává v případě, že relativní vlhkost $\varphi = 0$ a měrná vlhkost $x = 0$. V ostatních případech jde o vzduch nenasycený či nasycený a při jeho určování nejprve stanovíme teplotu t . Ze vztahu (3.9b) můžeme s pomocí zadaných hodnot relativní vlhkosti φ a měrné vlhkosti x vyjádřit tlak stých par $p_p''(t)$. Hodnotu teploty t je třeba ze závislostí (2.2) a (2.3) určit iteračně (výjimkou jsou vztahy (2.2c) a (2.3c)). Tento iterační postup je analogický postupu popsanému při určování teploty rosného bodu t_r popsaném v rámci procedury „ p, t, φ “. Jakmile známe teplotu t , pokračujeme ve výpočtu v souladu s procedurou „ p, t, φ “.

5.7 Procedura p, φ, i

Protože je zadána relativní vlhkost φ , víme že se jedná o vzduch nenasycený nebo nasycený. Měrná vlhkost x se tedy řídí rovnicí (3.9b) resp. (3.9c) a entalpie i rovnicí (3.15a) resp. (3.15b). V rovnici pro entalpii vystupují dvě neznámé, a to měrná vlhkost x a teplota t . Za měrnou vlhkost x dosadíme výraz ze vztahu (3.9b) resp. (3.9c) a dostáváme rovnici o jedné neznámé, kterou je teplota t . Tuto rovnici však nelze řešit exaktně a je nutné přistoupit k iteračnímu řešení podobné tomu, které bylo popsáno při určování teploty rosného bodu t_r v proceduře „ p, t, φ “. Jakmile se iteračním postupem vypočte teplota t , je možné pokračovat v určování zbylých veličin ve smyslu procedury „ p, t, φ “.

5.8 Procedura p, φ, t_m

Jelikož je zadána relativní vlhkost φ , jedná se opět o nenasycený či nasycený vzduch. Dosadíme-li zadanou hodnotu teploty mokrého teploměru t_m do rovnice (3.20a) příp. (3.20b), dostaneme lineární závislost $i = i(x)$, kterou porovnáme s rovnicí entalpie nenasyceného či nasyceného vzduchu, tedy se vztahy (3.15a) resp. (3.15b). Tím dostaneme rovnici, ve které neznáme měrnou vlhkost x a teplotu t . Měrnou vlhkost lze však opět vyjádřit ze vztahu (3.9b) pomocí známé relativní vlhkosti φ a neznámé teploty t . Dostáváme tak opět rovnici o jedné neznámé a tou je teplota t . Tu však opět nelze exaktně vyjádřit a je nutné iterační řešení. Jakmile známe teplotu t , pokračujeme dále ve výpočtech jako v proceduře „ p, t, φ “. Zvláštní případ nastává, když pro teplotu mokrého teploměru platí $t_m = t_{12}$. Tento případ znázorňuje obr. 5.7. Řešením jsou pak všechny body ležící na dané křivce $\varphi = \text{konst.}$ vymezené prodloužením klínu izotermy t_{12} do oblasti nenasyceného vzduchu. Jde tedy o stav nejednoznačný.



Obr. 5.7 K popisu procedury „ p, φ, t_m “

5.9 Procedura p, φ, t_r

Užitím vztahu (3.9c) určíme měrnou vlhkost $x = x_p''(t_r)$. Dále postupujeme obdobně jako v proceduře „ p, φ, x “.

5.10 Procedura p, x, i

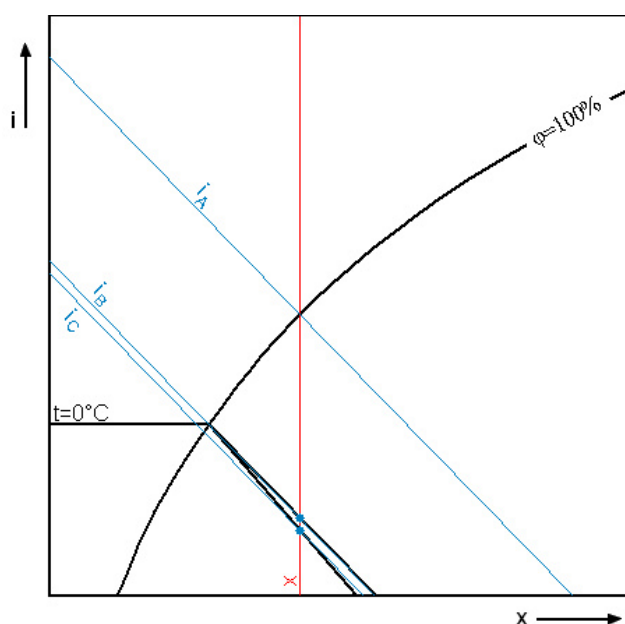
Řešení této procedury spočívá v určení teploty t a v následujícím řešení, které je analogické proceduře „ p, t, x “. Nejprve je nutno určit, jestli se zadaný stav vzduchu nachází v nenasycené, nasycené nebo přesycené oblasti. K tomu slouží porovnání zadané entalpie i s entalpií i_A , viz obr. 5.8. Hodnotu entalpie i_A určíme ze vztahu (3.15a), kam dosadíme zadanou hodnotu měrné vlhkosti x a za teplotu t dosadíme teplotu rosného bodu $t = t_r$, kterou určíme iteračně pro zadanou hodnotu měrné vlhkosti $x = x_p''(t_r)$.

Jestliže pro entalpii i platí $i \geq i_A$, jde o vzduch nenasycený či nasycený a teplotu t lze vypočítat exaktně ze vztahů (3.15a) resp. (3.15b).

Pokud je však entalpie $i < i_A$, jde o vzduch přesycený. Ve vztazích pro výpočet entalpie (3.15c), (3.15d) a (3.15e) vystupuje kromě teploty t také měrná vlhkost nasyceného vzduchu $x_p''(t)$, jde tedy o složitou funkci teploty t , kterou nelze vyjádřit exaktně a je nutné opět iterační řešení. Kterou z rovnic (3.15c), (3.15d), (3.15e) k řešení použijeme, určíme na základě srovnání zadané entalpie i s entalpiemi i_B a i_C , viz obr. 5.8.

Jestliže entalpie $i \geq i_B$, pak jde o vodní mlhu a k iteračnímu určení teploty t použijeme rovnici (3.15c). Poznamenejme, že hodnotu entalpie i_B určíme z rovnice (3.15c) pro zadanou hodnotu měrné vlhkosti x , teplotu $t = t_{12}$ a měrnou vlhkost vodní mlhy $x_k = x - x_p''(t_{12})$.

Pokud entalpie $i \leq i_C$, pak jde o ledovou mlhu a k iteračnímu určení teploty t použijeme rovnici (3.15d). Hodnotu entalpie i_C určíme z rovnice (3.15d) pro zadanou hodnotu měrné vlhkosti x , teplotu $t = t_{12}$ a měrnou vlhkost ledové mlhy $x_l = x - x_p''(t_{12})$.



Obr. 5.8 K popisu procedury „ p, x, i “

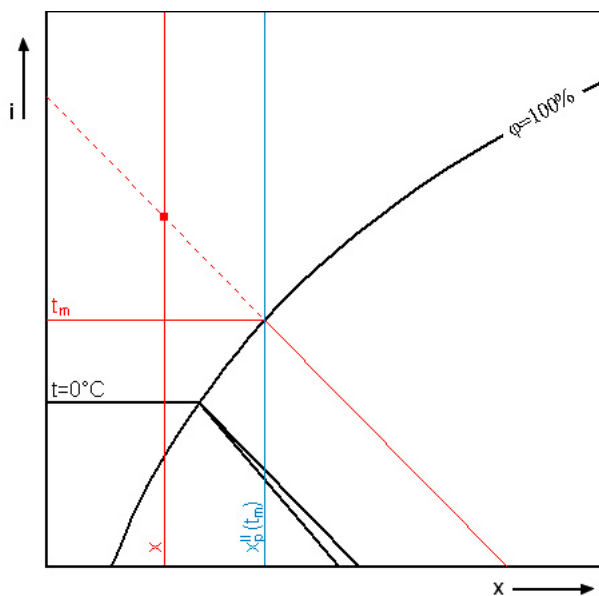
Poslední možnost nastane, pokud pro entalpii i platí $i_C < i < i_B$. V tomto případě půjde o směs vodní a ledové mlhy, tudíž hledaná teplota $t = t_{12}$.

5.11 Procedura p, x, t_m

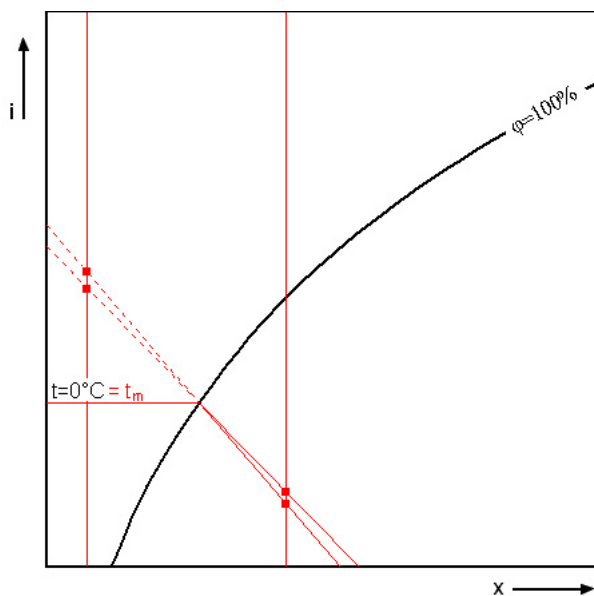
Nejprve určíme, v jaké oblasti se zadaný stav nachází. Za tímto účelem řešíme rovnici (3.9c) pro teplotu $t = t_m$, čímž určíme měrnou vlhkost $x_p''(t_m)$, viz obr. 5.9. Pokud pro zadanou hodnotu měrné vlhkosti x platí $x \geq x_p''(t_m)$, pak se jedná o nasycený nebo přesycený vzduch, a tudíž teplota $t = t_m$. Dále lze tedy pokračovat ve výpočtech ve smyslu procedury „ p, t, x “.

V případě, že pro zadanou měrnou vlhkost platí $x < x_p''(t_m)$, pak se jedná o vzduch nenasyčený. Této situaci odpovídá i případ znázorněný na obr. 5.9. Rovnice izoterm t je v této oblasti daná vztahem (3.15a), rovnice izoterm t_m vztahem (3.20a) resp. (3.20b). Jejich porovnáním dostáváme rovnici o jedné neznámé, kterou je teplota t a kterou lze v tomto případě vyjádřit a vypočítat exaktně. Jakmile známe teplotu t , pokračujeme dále ve výpočtech ve smyslu procedury „ p, t, x “.

Speciální situace nastane, jestliže měrná vlhkost $x \neq x_p''(t_m)$ a zároveň teplota mokrého teploměru $t_m = t_{12}$. Tento případ ilustruje obr. 5.10. Jde o stav nejednoznačný a řešením jsou všechny stavy ležící na příslušné čáře $x = konst.$ a současně v klínu či prodlouženém klínu izoterm t_{12} do oblasti nenasyčeného vzduchu.



Obr. 5.9 K popisu procedury „ p, x, t_m “



Obr. 5.10 K popisu procedury „ p, x, t_m “

5.12 Procedura p, x, t_r

Užitím vztahu (3.9c) určíme pro teplotu $t = t_r$ měrnou vlhkost nasyceného vzduchu $x_p''(t_r)$. Protože všem stavům, které v diagramu leží na téže čáře $x = konst.$, lze přisoudit stejnou teplotu rosného bodu t_r , mohou nastat pouze dvě situace.

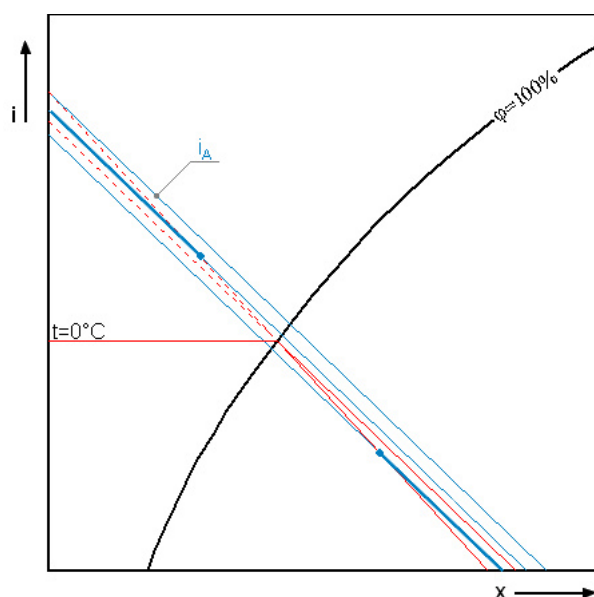
První nastane, pokud zadaná hodnota $x = x_p''(t_r)$. V tomto případě jsou řešením všechny stavy náležící příslušné čáře $x = konst.$, stav je tedy nejednoznačný.

Ve druhém případě platí $x \neq x_p''(t_r)$. Této podmínce však nevyhovuje žádný stav v diagramu a stav tudíž nelze nalézt.

5.13 Procedura p, i, t_m

V případě, že pro zadanou teplotu mokrého teploměru platí $t_m \neq t_{12}$, hledáme průsečík izotermy t_m a izoentaly i dle rovnice (3.20a) resp. (3.20b). Jedinou neznámou v této rovnici je měrná vlhkost x , kterou vyjádříme, spočteme a pokud $x \geq 0$, pak pokračujeme v řešení dalších veličin ve smyslu procedury „ p, x, i “. Jestliže ale pro vypočtenou měrnou vlhkost platí $x < 0$, pak hledaný stav nelze v diagramu nalézt.

Pokud pro zadanou hodnotu teploty mokrého teploměru platí $t_m = t_{12}$, mohou nastat situace, které ilustruje obr. 5.11. Hodnotu entalpie i_A je možné určit z rovnice (3.20b) pro měrnou vlhkost $x = 0$ a pro teplotu mokrého teploměru $t_m = t_{12}$. Jestliže hodnota zadané entalpie $i > i_A$, pak stav v diagramu nelze najít. V opačném případě jde o stav nejednoznačný. Jak ilustruje obr. 5.11, jsou v tomto případě řešením všechny stavy o entalpii i , které náležejí do klínu nebo prodlouženého klínu izotermy t_{12} . Speciální případ nastane, když zadaná hodnota entalpie i bude rovna entalpii nasyceného vzduchu o teplotě t_{12} . Hodnotu této entalpie můžeme stanovit ze vztahu (3.15b) pro teplotu $t = t_{12}$. V tomto případě budou řešením všechny stavy náležející izoentalpě i , což je důsledek identické směrnice izoentalp a horní větve izotermy t_{12} .



Obr. 5.11 K popisu procedury „ p, i, t_m “

5.14 Procedura p, i, t_r

Užitím vztahu (3.9c) určíme měrnou vlhkost $x = x_p''(t_r)$. Dále postupujeme obdobně jako v proceduře „ p, x, i “.

5.15 Procedura p, t_m, t_r

Užitím vztahu (3.9c) určíme měrnou vlhkost $x = x_p''(t_r)$. Dále postupujeme obdobně jako v proceduře „ p, x, t_m “.

6 Procedury řešení izobarických změn vlhkého vzduchu

Všechny tyto procedury určují výchozí stav vzduchu a stav vzduchu po příslušné izobarické změně. Výchozí stav se zadává celkovým tlakem p a dvojicí vybraných stavových veličin (teplota t , relativní vlhkost ϕ , měrná vlhkost x , měrná entalpie i , teplota mokrého teploměru t_m , teplota rosného bodu t_r). Před samotným výpočtem úpravy se vždy určí výchozí stav upravovaného vzduchu s využitím příslušné procedury, viz kapitola 5. Následuje kontrola jednoznačnosti výchozího stavu vzduchu a také kontrola parametrů úpravy. Teprve poté dochází k výpočtu. Kontrola parametrů příslušné úpravy a samotný výpočet úpravy je popsán v rámci jednotlivých procedur.

Procedury mají dále společné to, že ze zadaného *průtoku* vzduchu, u kterého volíme jednotky, určují hmotnostní tok suchého vzduchu \dot{m}_v zařízením či klimatizovaným prostorem následujícím způsobem:

$$\text{pokud je } \textit{průtok} \text{ zadán v } \text{kg}_{\text{s.v.}} \cdot \text{s}^{-1}, \text{ pak } \dot{m}_v = \textit{průtok}, \quad (6.1a)$$

$$\text{pokud je } \textit{průtok} \text{ zadán v } \text{kg}_{\text{s.v.}} \cdot \text{h}^{-1}, \text{ pak } \dot{m}_v = \frac{\textit{průtok}}{3600}, \quad (6.1b)$$

$$\text{pokud je } \textit{průtok} \text{ zadán v } \text{kg} \cdot \text{s}^{-1}, \text{ pak } \dot{m}_v = \frac{\textit{průtok}}{1 + x_I}, \quad (6.1c)$$

$$\text{pokud je } \textit{průtok} \text{ zadán v } \text{kg} \cdot \text{h}^{-1}, \text{ pak } \dot{m}_v = \frac{\textit{průtok}}{3600 \cdot (1 + x_I)}, \quad (6.1d)$$

$$\text{pokud je } \textit{průtok} \text{ zadán v } \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}, \text{ pak } \dot{m}_v = \frac{\rho_I \cdot \textit{průtok}}{1 + x_I}, \quad (6.1e)$$

$$\text{pokud je } \textit{průtok} \text{ zadán v } \text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}, \text{ pak } \dot{m}_v = \frac{\rho_I \cdot \textit{průtok}}{3600 \cdot (1 + x_I)}. \quad (6.1f)$$

Poznamenejme, že pokud se výchozí stav vzduchu nachází v přesycené oblasti, předpokládáme v souladu s [9], že objem kapalné a tuhé fáze obsažené ve vzduchu je zanedbatelný (tzn. $V_k = V_t \approx 0$), z čehož pro hustotu plyne $\rho_I = \rho_I''$. Objemové toky vzduchu před \dot{V}_I a po \dot{V}_{II} úpravě se určují ze vztahu

$$\dot{V}_{I,II} = \frac{\dot{m}_v \cdot (1 + x_{I,II})}{\rho_{I,II}}. \quad (6.2)$$

Do tabulky výsledků jsou zapsány vybrané stavové veličiny (p , t , ϕ , x , i , t_m , t_r , ρ) výchozího a upraveného stavu vzduchu, dále hmotnostní tok suchého vzduchu \dot{m}_v a objemový tok vzduchu \dot{V} zařízením či klimatizovaným prostorem, předávaný či odebíraný tepelný výkon \dot{Q} a hmotnostní tok přiváděné či odváděné vlhkosti \dot{m}_w . Do $i - x$ diagramu je vyznačen stav vzduchu před a po úpravě a také směr změny stavu vzduchu.

Jestliže se stav vzduchu po úpravě II (popř. S) nachází v přesycené oblasti, je spočten i stav po případném vysrážení vlhkosti II^* (popř. S^*), který je rovněž zaznačen do $i - x$ diagramu a hodnoty jeho stavových veličin zapsány do tabulky výsledků. Tuto situaci ilustruje obr. 4.4. K určení stavu po vysrážení II^* je užito procedury „ p , t , ϕ “, a to pro daný celkový tlak p , teplotu $t_{II^*} = t_{II}$ (popř. $t_{S^*} = t_S$) a relativní vlhkost $\phi = 1$. Odebraný tepelný tok \dot{Q} a hmotnostní tok odlučované vlhkosti \dot{m}_w jsou určovány pomocí vztahů (4.6) a (4.7).

6.1 Procedura ohřev

Zadáva se jeden z následujících parametrů ohřevu:

- teplota vzduchu po ohřevu t_{II} ,
- výkon ohříváče \dot{Q}_o .

Pokud je zadána teplota vzduchu po ohřevu t_{II} , kontroluje se, zda pro ni platí $t_{II} > t_I$. Následuje samotný výpočet ohřevu. Protože se měrná vlhkost při ohřevu nemění, platí $x_{II} = x_I$ a pro hmotnostní tok vlhkosti $\dot{m}_w = 0$. Je-li zadána teplota t_{II} , pak výkon ohříváče \dot{Q}_o určíme ze vztahu (4.1). Jestliže je zadán výkon ohříváče \dot{Q}_o , pak teplotu vzduchu po ohřátí t_{II} stanovíme rovněž ze vztahu (4.1). Stav vzduchu po ohřátí II lze v obou případech určit pomocí procedury „ p , t , x “.

6.2 Procedura chlazení

Volí se mezi chlazením v chladiči a chlazením ve volném prostoru. Jestliže jde o chlazení ve volném prostoru, pak je zadávaným parametrem chlazení výsledná teplota t_{II} . Kontroluje se, zda pro ni platí $t_{II} < t_I$. Následuje samotný výpočet chlazení. Protože se měrná vlhkost při chlazení ve volném prostoru nemění, platí $x_{II} = x_I$ a pro hmotnostní tok vlhkosti $\dot{m}_w = 0$. Chladicí výkon se určí ze vztahu (4.2). Stav vzduchu po chlazení II je určen pomocí procedury „ p , t , x “ . Příklad chlazení ve volném prostoru ilustruje obr. 4.4.

Pokud jde o chlazení v chladiči, pak se zadává povrchová teplota chladiče t_{pch} a jeden z následujících parametrů chlazení:

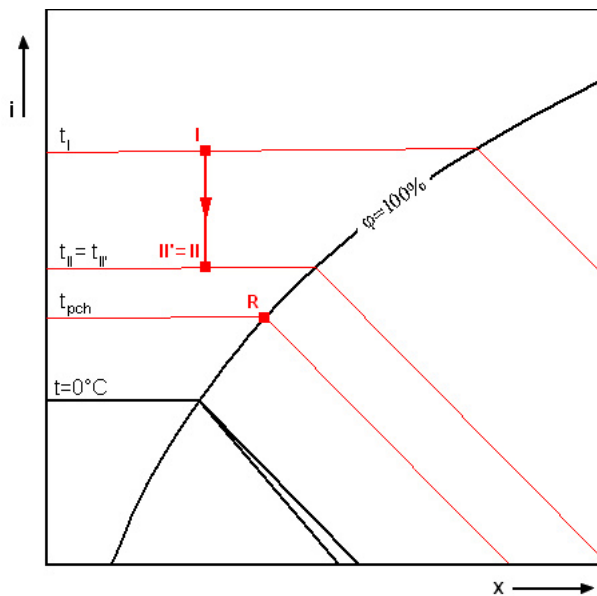
- teplota vzduchu po chlazení t_{II} ,
- výkon chladiče \dot{Q}_{ch} ,
- měrná vlhkost vzduchu po chlazení x_{II} .

Aby vůbec ke chlazení došlo, musí zadaná povrchová teplota chladiče splňovat podmínku $t_{pch} < t_I$. Jak již bylo řečeno, chlazení rozlišujeme suché ($t_{rl} \geq t_{pch}$) a mokré ($t_{rl} < t_{pch}$) , viz obr. 4.2 a obr. 4.3.

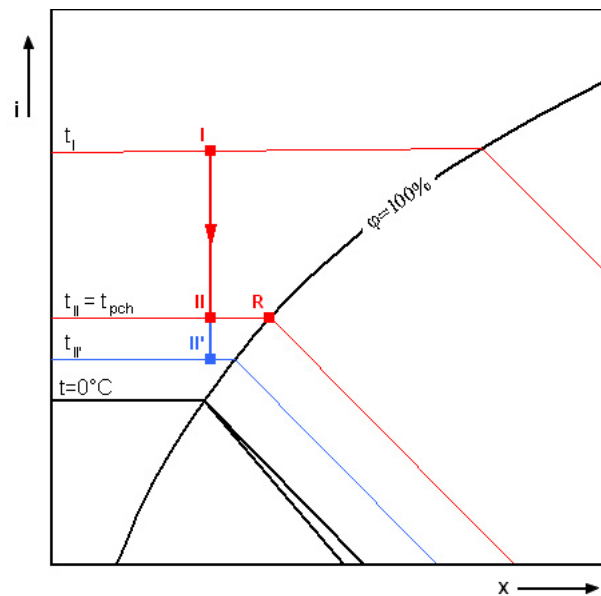
Pokud je zadána teplota vzduchu po chlazení t_{II} , pak se provádí kontrola, zda platí $t_{pch} < t_{II} < t_I$. Poté následuje výpočet. Určí se, zda jde o suché nebo mokré chlazení. V případě suchého chlazení platí, že měrná vlhkost $x_{II} = x_I$, hmotnostní tok vlhkosti $\dot{m}_w = 0$, stav II lze určit pomocí procedury „ p , t , x “ a výkon chladiče spočteme ze vztahu (4.2). V případě, že jde o mokré chlazení, určíme rosný bod chladiče R užitím procedury „ p , t , φ “ pro $t = t_{pch}$ a $\varphi = 1$. Měrnou vlhkost x_{II} určíme pomocí směrnice chlazení δ , viz vztah (4.5), a izotermy t_{II} , viz příslušná rovnice (3.15). Poté lze stav II určit pomocí procedury „ p , t , x “ . Hmotnostní tok vlhkosti \dot{m}_w určíme ze vztahu (4.3) a výkon chladiče \dot{Q}_{ch} ze vztahu (4.4).

Případ, kdy je zadán výkon chladiče \dot{Q}_{ch} , ilustrují obr. 6.1 a 6.2. Při řešení nejdříve určíme stav II' a teprve poté kontrolujeme, zda k danému chlazení mohlo dojít, čili zda platí $t_{II'} \geq t_{pch}$. Z rovnice (4.4) nejprve určíme entalpii $i_{II'}$. Jde-li o suché chlazení, pak měrná

vlhkost $x_{II'} = x_I$, v opačném případě měrnou vlhkost $x_{II'}$ určíme ze směrnice chlazení δ dle vztahu (4.5). Další stavové veličiny stavu II' se určí pomocí procedury „ p, x, i “. Následuje zmíněná kontrola teploty ochlazeného vzduchu $t_{II'}$. Předpokládáme totiž, že v chladiči nemůže dojít k ochlazení na teplotu t_{II} nižší než je povrchová teplota chladiče t_{pch} . Pokud tedy platí $t_{II'} \geq t_{pch}$, pak stav II' prohlásíme za stav II . Tuto situaci ilustruje obrázek 6.1. V opačném případě byl zadán výkon chladiče zřejmě příliš velký a stav II určíme následovně. Jedná-li se o mokré chlazení, prohlásíme stav R za stav II . Jde-li o suché chlazení hledáme stav II dle procedury „ p, t, x “ pro $t_{II} = t_{pch}$ a $x_{II} = x_I$. Tuto situaci ilustruje obrázek 6.2. K výpočtu hmotnostního toku vlhkosti \dot{m}_w a výkonu chladiče \dot{Q}_{ch} uijeme vztah (4.3) resp. (4.4).



Obr. 6.1 K popisu procedury „chlazení“



Obr. 6.2 K popisu procedury „chlazení“

Pokud je zadána měrná vlhkost vzduchu po chlazení x_{II} , pak aby došlo k chlazení a odvlhčení, musí platit $x_R < x_{II} < x_I$. Poznamenejme, že pokud by platilo $x_{II} = x_I$, stav II by nebylo možné jednoznačně určit, tudíž v případě, kdy je zadána měrná vlhkost x_{II} , uvažujeme pouze případ mokrého chlazení. Entalpii i_{II} určíme ze známé směrnice chlazení δ podle vztahu (4.5). Zbýlé stavové veličiny stavu II určíme užitím procedury „ p, x, i “. K výpočtu hmotnostního toku vlhkosti \dot{m}_w a výkonu chladiče \dot{Q}_{ch} uijeme opět vztah (4.3) resp. (4.4).

6.3 Procedura míšení

Zadávanými parametry míšení jsou pouze průtoky jednotlivých proudů vzduchu, tedy průtok_1 a průtok_2 . Z nich se již popsaným způsobem vypočtou hmotnostní toky suchého vzduchu \dot{m}_{v1} , \dot{m}_{v2} a objemové toky vzduchu \dot{V}_I, \dot{V}_{II} , viz vztahy (6.1) a (6.2). Výpočet stavu směsi S se provádí užitím vztahů (4.9) a (4.10), ze kterých se určí měrná vlhkost x_S a entalpie i_S , ostatní stavové veličiny směsi S se určí pomocí procedury „ p, x, i “.

6.4 Procedura vlhčení

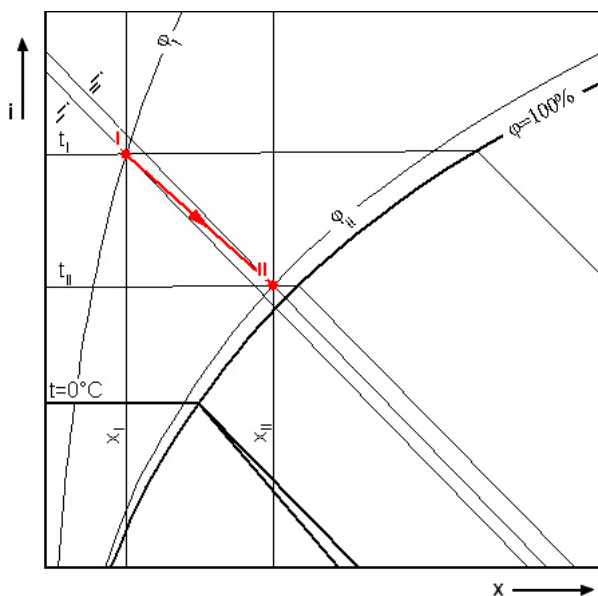
Na výběr je možnost vlhčení:

- vodou - zadává se teplota vody t_w ,
- parou - zadává se entalpie páry i_w .

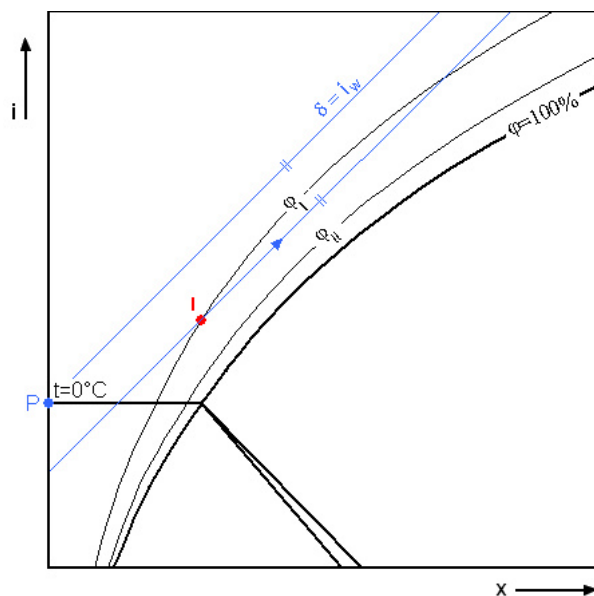
Pokud bylo vybráno vlhčení vodou, pak se určí její entalpie i_w pro zadanou teplotu vody t_w ze vztahu (3.11). Příklad vlhčení vodou ilustruje obr. 6.3. Dále se volí jeden z následujících parametrů vlhčení:

- relativní vlhkost vzduchu po vlhčení φ_{II} ,
- měrná vlhkost vzduchu po vlhčení x_{II} ,
- hmotnostní tok přiváděné vlhkosti \dot{m}_w .

Pokud je zadána relativní vlhkost vzduchu po vlhčení φ_{II} , pak se provádí kontrola, zda platí $\varphi_{II} > \varphi_I$. Teprve poté následuje iterační výpočet měrné vlhkosti x_{II} , který využívá vztahy (4.14), (3.15a) a (3.9b). Stav II určíme užitím procedury „ p, φ, x “. Poznamenejme, že směr vlhčení δ daný entalpií vlhčícího média i_w nemusí danou křivku $\varphi_{II} = konst.$ v $i-x$ diagramu protnout, jak ilustruje obr. 6.4. Vlhčení v tomto případě na požadovanou hodnotu relativní vlhkosti φ_{II} nelze uskutečnit. Tato situace může nastat v případě, když vlhčíme parou o značně vysoké entalpii i_w .



Obr. 6.3 K popisu procedury „vlhčení“



Obr. 6.4 K popisu procedury „vlhčení“

Jestliže je zadána měrná vlhkost vzduchu po vlhčení x_{II} , pak se provádí kontrola, zda platí $x_{II} > x_I$. Poté následuje výpočet entalpie i_{II} ze směrnice vlhčení δ dle vztahu (4.14). Stav vzduchu po vlhčení II se určí užitím procedury „ p, x, i “.

Pokud je zadán hmotnostní tok vlhkosti \dot{m}_w , určí se měrná vlhkost x_{II} a entalpie i_{II} ze vztahu (4.12) resp. (4.13). Stav vzduchu II se opět určí pomocí procedury „ p, x, i “.

Ve všech případech se při vlhčení hmotnostní tok vlhkosti \dot{m}_w určí ze vztahu (4.12) nebo (4.13) a předaný tepelný tok \dot{Q} ze vztahu

$$\dot{Q} = \dot{m}_v \cdot (i_{II} - i_I). \quad (6.4)$$

6.5 Procedura změna stavu vzduchu v klimatizovaném prostoru

Zadáva se tepelná bilance klimatizovaného prostoru, tedy tepelný zisk či ztráta citelným \dot{Q}_{ic} a vázaným \dot{Q}_{iv} teplem, a jeden z následujících parametrů změny stavu v klimatizovaném prostoru:

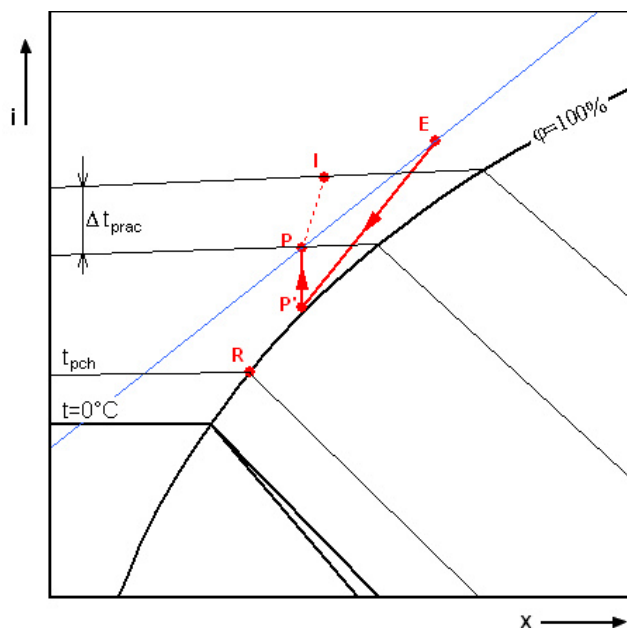
- pracovní rozdíl teplot Δt_{prac} ,
- hmotnostní tok suchého vzduchu \dot{m}_v klimatizovaným prostorem.

Pokud je zadán pracovní rozdíl teplot Δt_{prac} (letní provoz), pak řešení provedeme tak, že ze vztahů (4.17) a (4.21) určíme hmotnostní tok suchého vzduchu \dot{m}_v , který následně dosadíme do rovnic (4.16) a (4.18). Dostaneme tak entalpii i_p a měrnou vlhkost x_p . Následně užitím procedury „ p, x, i “ určíme stav P . Jestliže je zadán hmotnostní tok suchého vzduchu \dot{m}_v (zimní provoz), pak s využitím vztahu (4.16) a (4.18) určíme entalpii i_p a měrnou vlhkost x_p . Následně opět užitím procedury „ p, x, i “ určíme stav P .

V obou případech se hmotnostní tok vlhkosti \dot{m}_w určuje ze vztahu (4.18) a předaný tepelný výkon \dot{Q} odpovídá celkovému tepelnému zisku či ztrátě \dot{Q}_i dle rovnice (4.15).

6.6 Procedura psychrometrický výpočet

Tato procedura využívá předešlé procedury úprav vzduchu. Uživatel zadává výchozí stav vzduchu obvyklým způsobem a dále sám volí posloupnost následujících až 6 úprav. Zadávají se jen parametry úprav, neboť výchozí stav vzduchu před úpravou je určen koncovým stavem vzduchu po úpravě předcházející. Procedura *změna stavu vzduchu v klimatizovaném prostoru* je zde jen jakýmsi pomocným výpočtem, který slouží k určení stavu přiváděného vzduchu P do klimatizovaného prostoru. Jedinou změnou disponuje úprava *chlazení*, do které je navíc zařazena možnost určení povrchové teploty chladiče t_{pch} . Jedná se o iterační výpočet průsečíku křivky nasycení $\phi = 1$ a směrnice chlazení, která je určena stavem před chlazením (na obr. 6.5 stav E) a stavem přiváděného vzduchu P . Průsečík však nemusí existovat, jak rovněž ilustruje obr. 6.5. Pak je nutné buď zvolit povrchovou teplotu chladiče t_{pch} a za chlazení zařadit ohřev (viz obr. 6.5) a nebo výpočet zopakovat pro jiný pracovní rozdíl teplot Δt_{prac} .



Obr. 6.5 K proceduře „psychrometrický výpočet“

7 Popis programu Vlhký vzduch 3.0

Pro tvorbu programu bylo použito vývojové prostředí Delphi 7. Software pracuje pod operačním systémem Windows a lze ho považovat za nástupce programů Vlhký vzduch 1.2 [8] a Vlhký vzduch 2.0 [11]. Jde o interaktivní grafický program, který určuje stavy vlhkého vzduchu a vyznačuje je v Mollierově i - x diagramu. Stav vzduchu se do programu zadává celkovým tlakem p a dvojicí stavových veličin: t , φ , x , i , t_m , t_r . Následný výpočet se provádí podle příslušné procedury (kapitola 5). Ve většině případů jsou hodnoty veličin řešeny exaktně, v některých případech bylo nutné použít iterační výpočet.

Kromě určování stavů vlhkého vzduchu program umožňuje řešit základní úpravy vzduchu užívané v oboru klimatizace. Jde o ohřev, chlazení, míšení a vlhčení. Výchozí stav vzduchu před úpravou se zadává opět celkovým tlakem p a dvojicí stavových veličin: t , φ , x , i , t_m , t_r . Dále se zadávají parametry příslušné úpravy:

- ohřev: průtok vzduchu ohřívacem a teplota po ohřátí t_{II} nebo výkon ohříváče \dot{Q} ,
- chlazení: průtok vzduchu chladičem, povrchová teplota chladiče t_{pch} a teplota po chlazení t_{II} nebo výkon chladiče \dot{Q} nebo měrná vlhkost po chlazení x_{II} ,
- míšení: průtoky míšených proudů vzduchu,
- vlhčení: průtok vzduchu zvlhčovačem, teplota vlhčící vody t_w (vlhčení vodou) nebo entalpie vlhčící páry i_w (vlhčení parou) a jeden z parametrů relativní vlhkost po vlhčení φ_{II} nebo měrná vlhkost po vlhčení x_{II} nebo hmotnostní tok přiváděné vlhkosti \dot{m}_w .

Výpočet úpravy vlhkého vzduchu se opět provádí podle příslušné procedury (kapitola 6). Podrobněji je práce s programem při výpočtu úprav vzduchu popsána v Návodu k obsluze programu Vlhký vzduch 3.0, který je přílohou této práce.

Další funkcí programu je psychrometrický výpočet, pomocí kterého se určí stav a popř. množství vzduchu přiváděného do klimatizovaného prostoru. Následně uživatel volí libovolnou vhodnou posloupnost zmíněných úprav vzduchu a to tak, aby dosáhl stavu přiváděného vzduchu. Názorně je postup psychrometrického výpočtu s využitím programu popsán na konkrétních příkladech v již zmíněném Návodu k obsluze programu Vlhký vzduch 3.0. Následuje výčet funkcí programu Vlhký vzduch 3.0:

- Určení stavu vzduchu zadaného celkovým tlakem p a dvojicí veličin: t , x , i , t_m , t_r .
- Určení oblasti vlhkého vzduchu: Nenasycený vzduch, nasycený vzduch, přesycený vzduch - vodní mlha, přesycený vzduch - ledová mlha, přesycený vzduch - směs vodní a ledové mlhy, popř. nejednoznačný stav nebo stav nenalezen.
- Výpočet dalších veličin daného stavu: p_p'' , ρ_p'' , x_p'' , i_p'' , p_p , ρ_p , ρ_v , ρ , x_p , x_K , x_T .
- Určení až 10 stavů vlhkého vzduchu.
- Výpočet úprav vlhkého vzduchu - ohřev, chlazení, míšení a vlhčení.
- Psychrometrický výpočet.
- Uložení vypočtených hodnot do souboru ve formátu *.csv.
- Uložení i - x diagramu vlhkého vzduchu do souboru ve formátu *.bmp nebo *.jpg.
- Tisk i - x diagramu vlhkého vzduchu.
- Nastavení zobrazované oblasti, tj. rozsahu i - x diagramu.
- Nastavení vykreslení diagramu (barva, tloušťka a krok, se kterým mají být zvolené izočáry vykresleny; barva pozadí diagramu, velikost písma).
- Nastavení vyznačení stavu (barva a tloušťka izochar procházejících daným stavem; volba barvy, velikosti a typu zvýraznění stavu v diagramu).
- Nastavení fyzikálních vlastností.
- Nastavení rozsahu zadávaných hodnot.
- Možnost uložení a opětovného načtení všech parametrů nastavení programu.

8 Závěr

Vytvořený interaktivní grafický software Vlhký vzduch 3.0 pracuje pod operačním systémem Windows. Počítá stavy vlhkého vzduchu pro zadaný celkový tlak p a libovolnou dvojici stavových veličin (t , φ , x , i , t_m , t_r). Program byl dále rozšířen o výpočty základních úprav vlhkého vzduchu (ohřev, chlazení, míšení a vlhčení) a o psychrometrický výpočet. Určený stav, úprava vzduchu nebo posloupnost úprav (v případě psychrometrického výpočtu) je v rámci řešení zakreslována do Mollierova i - x diagramu. Vykreslovaný i - x diagram lze v mnoha ohledech modifikovat (rozsah diagramu, volba vykreslování izochar,...) a v případě potřeby uložit či vytisknout. Rovněž je možné ukládat vypočtené hodnoty. Uživatel má možnost ukládat a opětovně načítat vlastní nastavení programu. V případě potřeby je možné editovat fyzikální vlastnosti složek vlhkého vzduchu, tedy vlastnosti suchého vzduchu a vody, se kterými program počítá. Součástí programu je i podrobná nápověda, jejímž obsahem je podrobný popis programu a názorné ukázky práce s programem na konkrétních příkladech.

Snahou bylo vytvořit program uživatelsky přívětivý, s intuitivním ovládáním a s dostatečnou odolností vůči chybám uživatele. Jelikož program kromě výpočtu stavu vlhkého vzduchu řeší i úpravy vzduchu a psychrometrický výpočet, lze předpokládat, že se uplatní při řešení problémů týkajících se vytápění, větrání a klimatizace, či jako výuková pomůcka v předmětech termomechanika, technika prostředí a podobných.

9 Seznam nejdůležitějších označení

Označení	Jednotka	Veličina
c	$[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$	<i>měrná tepelná kapacita,</i>
c_k	$[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$	<i>měrná tepelná kapacita vody v kapalném stavu,</i>
c_{pp}	$[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$	<i>měrná tepelná kapacita vodní páry při konstantním tlaku,</i>
c_{pv}	$[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$	<i>měrná tepelná kapacita s. v. při konstantním tlaku,</i>
c_t	$[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$	<i>měrná tepelná kapacita vody v tuhém stavu,</i>
i	$[J \cdot kg_{s.v.}^{-1}]$	<i>měrná entalpie vlhkého vzduchu,</i>
i_w	$[J \cdot kg^{-1}]$	<i>měrná entalpie vlhčící páry,</i>
l_{12}	$[J \cdot kg^{-1}]$	<i>měrné skupenské teplo tání/tuhnutí,</i>
l_{13}	$[J \cdot kg^{-1}]$	<i>měrné skupenské teplo sublimace/desublimace,</i>
l_{23}	$[J \cdot kg^{-1}]$	<i>měrné skupenské teplo výparné/kondenzační,</i>
m	$[kg]$	<i>hmotnost,</i>
m_k	$[kg]$	<i>hmotnost kapalné fáze,</i>
m_p	$[kg]$	<i>hmotnost přehřáté páry,</i>
m_t	$[kg]$	<i>hmotnost tuhé fáze,</i>
m_v	$[kg]$	<i>hmotnost suchého vzduchu,</i>
\dot{m}_v	$[kg_{s.v.} \cdot s^{-1}]$	<i>hmotnostní tok suchého vzduchu,</i>
\dot{m}_w	$[kg \cdot s^{-1}]$	<i>hmotnostní tok vlhkosti,</i>
M_i	$[kg \cdot mol^{-1}]$	<i>molární hmotnost i-té složky směsi,</i>
M_p	$[kg \cdot mol^{-1}]$	<i>molární hmotnost vody,</i>
M_v	$[kg \cdot mol^{-1}]$	<i>zdánlivá molární hmotnost suchého vzduchu,</i>
p	$[Pa]$	<i>celkový tlak,</i>
p_{kr}	$[Pa]$	<i>kritický tlak,</i>
p_p	$[Pa]$	<i>parciální tlak přehřáté páry,</i>
$p_p^{//}$	$[Pa]$	<i>parciální tlak syté páry,</i>
p_{tr}	$[Pa]$	<i>tlak trojného bodu,</i>
p_v	$[Pa]$	<i>parciální tlak suchého vzduchu,</i>
\dot{Q}	$[W]$	<i>tepelný tok,</i>
\dot{Q}_{ch}	$[W]$	<i>výkon chladiče,</i>
\dot{Q}_i	$[W]$	<i>celkový tepelný zisk či ztráta,</i>
\dot{Q}_{ic}	$[W]$	<i>tepelný zisk citelným teplem,</i>
\dot{Q}_{iv}	$[W]$	<i>tepelný zisk vázaným teplem,</i>
\dot{Q}_o	$[W]$	<i>výkon ohřívače,</i>

r_p	$[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$	<i>měrná plynová konstanta vodní páry,</i>
r_v	$[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$	<i>měrná plynová konstanta suchého vzduchu,</i>
t, T	$[^{\circ}C], [K]$	<i>teplota Celsiova, termodynamická,</i>
t_{12}, T_{12}	$[^{\circ}C], [K]$	<i>teplota tání/ tuhnutí Celsiova, termodynamická,</i>
t_{13}, T_{13}	$[^{\circ}C], [K]$	<i>teplota sublimace/desublimace Celsiova, termodynamická,</i>
t_{23}, T_{23}	$[^{\circ}C], [K]$	<i>teplota varu/kondenzace Celsiova, termodynamická,</i>
t_{kr}, T_{kr}	$[^{\circ}C], [K]$	<i>kritická teplota Celsiova, termodynamická,</i>
t_m	$[^{\circ}C]$	<i>teplota mokrého teploměru,</i>
t_{pch}	$[^{\circ}C]$	<i>povrchová teplota chladiče,</i>
t_r	$[^{\circ}C]$	<i>teplota rosného bodu,</i>
t_{tr}, T_{tr}	$[^{\circ}C], [K]$	<i>teplota trojného bodu Celsiova, termodynamická,</i>
t_w	$[^{\circ}C]$	<i>teplota vlhčící vody,</i>
V	$[m^3]$	<i>objem vlhkého vzduchu,</i>
V_p	$[m^3]$	<i>objem páry,</i>
V_v	$[m^3]$	<i>objem suchého vzduchu,</i>
x	$[kg \cdot kg_{s.v.}^{-1}]$	<i>měrná vlhkost vlhkého vzduchu,</i>
Z	$[-]$	<i>kompresibilní faktor,</i>
δ	$[J \cdot kg^{-1}]$	<i>směrové měřítko,</i>
Δt_{prac}	$[K]$	<i>pracovní rozdíl teplot,</i>
ϑ	$[-]$	<i>faktor citelného tepla,</i>
κ	$[-]$	<i>Poissonova konstanta,</i>
ρ	$[kg \cdot m^{-3}]$	<i>hustota vlhkého vzduchu,</i>
ρ_p	$[kg \cdot m^{-3}]$	<i>hustota přehřáté páry,</i>
$\rho_p^{//}$	$[kg \cdot m^{-3}]$	<i>hustota syté páry,</i>
ρ_v	$[kg \cdot m^{-3}]$	<i>hustota suchého vzduchu,</i>
φ	$[-]$	<i>relativní vlhkost,</i>
Φ	$[kg \cdot m^{-3}]$	<i>absolutní vlhkost.</i>

10 Seznam použitých zdrojů

- [1] ASHRAE Handbook 2001 Fundamentals, 2001, ASHRAE, Atlanta.
- [2] FIALOVÁ, M., ŠAFAŘÍK, P.: Základy termodynamiky vlhkého vzduchu 1. vyd. Praha: ČVUT, 1999.
- [3] CHYSKÝ, J.: Vlhký vzduch. SNTL Praha 1977.
- [4] CHYSKÝ, J., HEMZAL, K. a kol.: Technický průvodce Větrání a klimatizace. Bolit, 1993.
- [5] IAPWS: Revised Release on the Equation of State 2006 for H₂O Ice Ih [online]. 2009 [citováno 2010-02-22]. Dostupné z WWW: <http://www.iapws.org/relguide/Ice-Rev2009.pdf>
- [6] IAPWS: Revised release on the pressure along the melting and sublimation curves of ordinary water substance [online]. 2008 [citováno 2010-02-22]. Dostupné z WWW: <http://www.iapws.org/relguide/meltsub.pdf>
- [7] JANOTKOVÁ, E.: Technika prostředí. FSI VUT v Brně. 1991.
- [8] JANOTKOVÁ, E., PAVELEK, M.: Výpočty stavů vlhkého vzduchu počítačem s grafickým výstupem v h - x diagramu. Vytápění, větrání, instalace 9, 2000, 3, s. 122 - 124.
- [9] PAVELEK, M. a kol.: Termomechanika. FSI VUT v Brně. 2003.
- [10] PAVELEK, M., ŠTĚTINA, J.: Experimentální metody v technice prostředí. FSI VUT v Brně. 2007.
- [11] SOBOTKA A.: Interaktivní grafický software pro výpočty stavů vlhkého vzduchu. Diplomová práce. FSI VUT v Brně. 2004.
- [12] ŠIFNER, O., KLOMFAR, J.: Mezinárodní standardy termofyzikálních vlastností vody a vodní páry. Academia, nakladatelství Akademie věd ČR. Praha 1996.

11 Přílohy

